Conversão Eletromecânica de Energia

PROFESSOR
Me. Fábio Augusto Gentilin

ACESSE AQUI O SEU LIVRO NA VERSÃO **DIGITAL!**

EXPEDIENTE

DIREÇÃO UNICESUMAR

Reitor Wilson de Matos Silva **Vice-Reitor** Wilson de Matos Silva Filho **Pró-Reitor de Administração** Wilson de Matos Silva Filho **Pró-Reitor Executivo de EAD** William Victor Kendrick de Matos Silva **Pró-Reitor de Ensino de EAD** Janes Fidélis Tomelin **Presidente da Mantenedora** Cláudio Ferdinandi

NEAD - NÚCLEO DE EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA

Diretoria Executiva Chrystiano Mincoff, James Prestes, Tiago Stachon **Diretoria de Graduação e Pós-graduação** Kátia Coelho **Diretoria de Cursos Híbridos** Fabricio Ricardo Lazilha **Diretoria de Permanência** Leonardo Spaine **Head de Graduação** Marcia de Souza **Head de Metodologias Ativas** Thuinie Medeiros Vilela Daros **Head de Tecnologia e Planejamento Educacional** Tania C. Yoshie Fukushima **Head de Recursos Digitais e Multimídias** Franklin Portela Correia **Gerência de Planejamento e Design Educacional** Jislaine Cristina da Silva **Gerência de Produção Digital** Diogo Ribeiro Garcia **Gerência de Recursos Educacionais Digitais** Daniel Fuverki Hey **Supervisora de Design Educacional e Curadoria** Yasminn T. Tavares Zagonel **Supervisora de Produção Digital** Daniele Correia

PRODUÇÃO DE MATERIAIS

Coordenador de Conteúdo Fabio Augusto Gentilin **Designer Educacional** Antônio Eduardo Nicacio, Ana Cláudia Salvadego, Ana Elisa Faltz Davanço Portela **Revisão Textual** Érica Fernanda Ortega **Editoração** Matheus Silva de Souza **Ilustração** André Azevedo, Welington Oliveira **Realidade Aumentada** Nome **Fotos** Shutterstock

FICHA CATALOGRÁFICA

C397 **CENTRO UNIVERSITÁRIO DE MARINGÁ**.
Núcleo de Educação a Distância. **GENTILIN,** Fabio Augusto.

Conversão Eletromecânica de Energia.
Fábio Augusto Gentilin.
Maringá - PR.: Unicesumar, 2021.

232 p.
"Graduação - EaD".

1. Conversão 2. Eletromecânica 3. Energia. EaD. I. Título.

Impresso por:

CDD - 22 ed. 621.32
CIP - NBR 12899 - AACR/2
ISBN 978-65-5615-505-0

Bibliotecário: João Vivaldo de Souza CRB- 9-1679

Pró Reitoria de Ensino EAD Unicesumar
Diretoria de Design Educacional

UniCesumar

NEAD - Núcleo de Educação a Distância

Av. Guedner, 1610, Bloco 4 - Jd. Aclimação - Cep 87050-900 | Maringá - Paraná
www.unicesumar.edu.br | 0800 600 6360

BOAS-VINDAS

A UniCesumar celebra os seus 30 anos de história avançando a cada dia. Agora, enquanto Universidade, ampliamos a nossa autonomia e trabalhamos diariamente para que nossa educação à distância continue como uma das melhores do Brasil. Atuamos sobre quatro pilares que consolidam a visão abrangente do que é o conhecimento para nós: o intelectual, o profissional, o emocional e o espiritual.

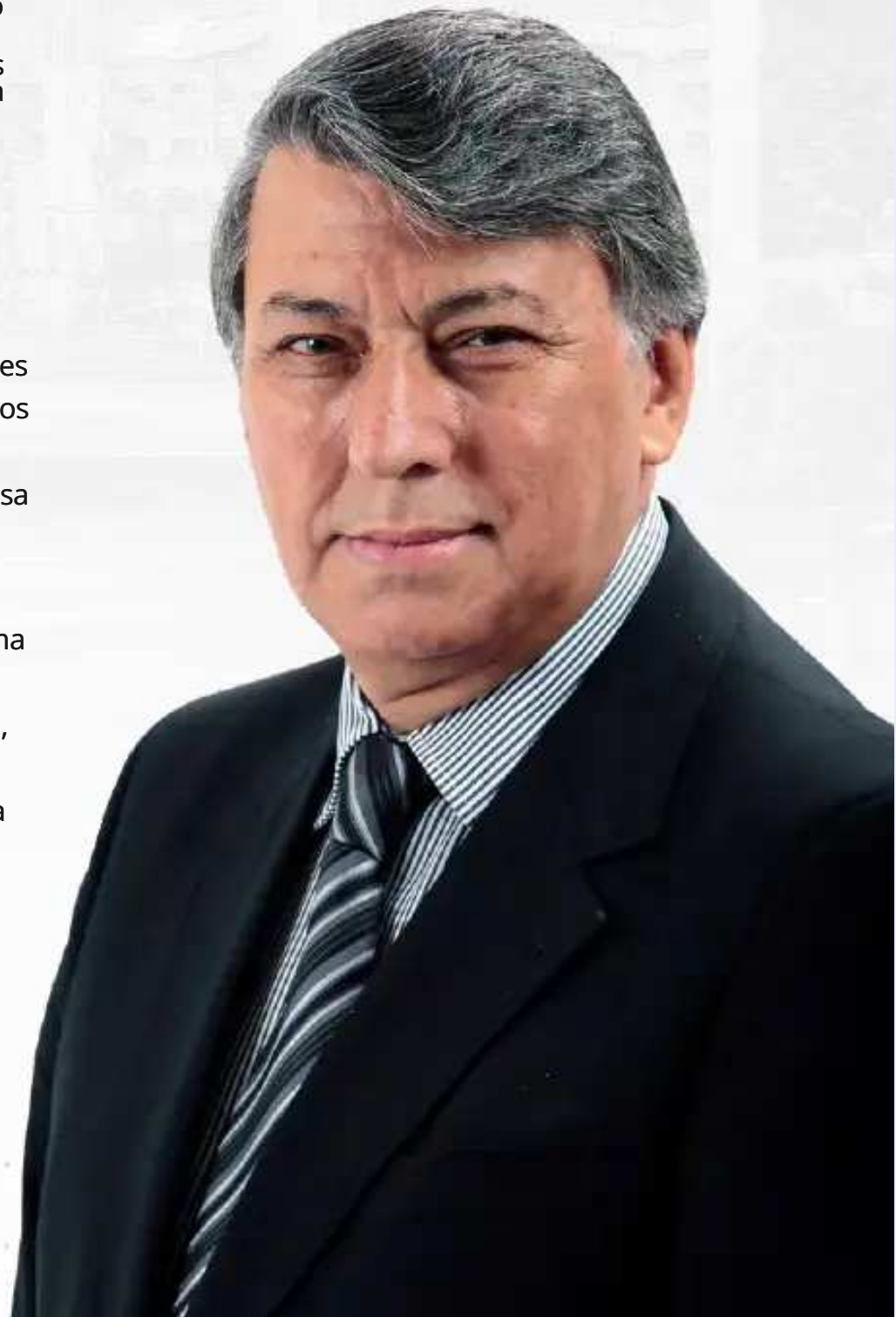
A nossa missão é a de "Promover a educação de qualidade nas diferentes áreas do conhecimento, formando profissionais cidadãos que contribuam para o desenvolvimento de uma sociedade justa e solidária". Neste sentido, a UniCesumar tem um gênio importante para o cumprimento integral desta missão: o coletivo. São os nossos professores e equipe que produzem a cada dia uma inovação, uma transformação na forma de pensar e de aprender. É assim que fazemos juntos um novo conhecimento diariamente.

São mais de 800 títulos de livros didáticos como este produzidos anualmente, com a distribuição de mais de 2 milhões de exemplares gratuitamente para nossos acadêmicos. Estamos presentes em mais de 700 polos EAD e cinco campi: Maringá, Curitiba, Londrina, Ponta Grossa e Corumbá), o que nos posiciona entre os 10 maiores grupos educacionais do país.

Aprendemos e escrevemos juntos esta belíssima história da jornada do conhecimento. Mário Quintana diz que "Livros não mudam o mundo, quem muda o mundo são as pessoas. Os livros só mudam as pessoas". Seja bem-vindo à oportunidade de fazer a sua mudança!

Reitor
Wilson de Matos Silva

> *"Tudo isso para honrarmos a nossa missão, que é promover a educação de qualidade nas diferentes áreas do conhecimento, formando profissionais cidadãos que contribuam para o desenvolvimento de uma sociedade justa e solidária."*



MINHA HISTÓRIA

MEU CURRÍCULO

Aqui você pode conhecer um pouco mais sobre mim, além das informações do meu currículo.

Quando eu tinha 10 anos de idade, na escola onde eu estudava havia um colega de sala que se sentava na carteira atrás da minha. Ele tinha um caderno cuja capa tinha uma foto de uma bicicleta de corrida, lindíssima por sinal. Todos os dias eu pedia a ele para ver o caderno. Ficava durante minutos admirando aquela máquina da Engenharia cheia de detalhes e peças delicadas. Naquele momento, eu pensava: quando eu crescer vou ter uma dessas!

O tempo foi passando e três anos mais tarde consegui ganhar do meu pai uma bicicleta bem interessante, com um conceito diferente daquele, mas que era muito legal.

Começava aí a paixão pelo ciclismo.

Eu não via a hora de ir para a escola só para pedalar, ou mesmo de chegar o fim de semana, para sair com os colegas de bicicleta. Contudo, havia algo a mais nessa história, algo que mais tarde faria parte da minha formação profissional. Eu comecei a me perguntar o porquê de cada peça, as marchas, os materiais de que eram fabricadas as diferentes peças, a posição dos componentes etc.

Aos poucos fui me tornando seletivo e detalhista. Quando avistava uma bicicleta, de longe já poderia dizer quais eram as peças e fabricantes. Comprava revistas sobre bicicletas e procurava desmontar tudo para ver como era o funcionamento e como manter a melhor forma possível.

Posso dizer hoje que isso já se passou há 27 anos e ainda continua a ser feito. Bicicletas após bicicletas eu ainda pedalo, estudo e analiso cada tecnologia que está ao meu alcance, sempre tentando entender o porquê de cada material, formato, alinhamento, tecnologia etc.

Analiso cada relação de transmissão entre diferentes marchas para decidir qual a melhor para cada situação, desempenho, distância, velocidade, grau de exigência, massa, tempo de manutenção, tipos de lubrificantes, tipos de terreno etc. com gráficos e projeções, que podem responder a muitas perguntas sobre minha prática no ciclismo e sobre a Engenharia das bikes.

Gosto de afirmar que quando pedalo meus pensamentos atingem um nível mais elevado e passo a raciocinar de maneira mais criativa. Na estrada, somos todos iguais, pois estamos sujeitos às mesmas dificuldades, afinal, subida é subida, não importa o que você tenha de equipamento, vai ter que se esforçar para vencer aquele desafio, e cada morro ultrapassado, uma vitória é somada. Naquele ambiente, resta apenas a humildade, não há espaço para mais nada.

É assim que vivo parte dos meus momentos, pedalando e contemplando a natureza, sempre curioso por saber como funcionam as coisas, me esforçando para vencer as ladeiras da vida e buscando aprender a humildade, procurando aprender a fazer algo de novo para melhorar a cada dia, pois a subida da vida é implacável.

http://lattes.cnpq.br/8899424045058024

RECURSOS DE IMERSÃO

REALIDADE AUMENTADA

Sempre que encontrar esse ícone, esteja conectado à internet e inicie o aplicativo Unicesumar Experience. Aproxime seu dispositivo móvel da página indicada e veja os recursos em Realidade Aumentada. Explore as ferramentas do App para saber das possibilidades de interação de cada objeto.

RODA DE CONVERSA

Professores especialistas e convidados, ampliando as discussões sobre os temas.

PÍLULA DE APRENDIZAGEM

Uma dose extra de conhecimento é sempre bem-vinda. Posicionando seu leitor de QRCode sobre o código, você terá acesso aos vídeos que complementam o assunto discutido

PENSANDO JUNTOS

Ao longo do livro, você será convidado(a) a refletir, questionar e transformar. Aproveite este momento.

EXPLORANDO IDEIAS

Com este elemento, você terá a oportunidade de explorar termos e palavras-chave do assunto discutido, de forma mais objetiva.

EU INDICO

Enquanto estuda, você pode acessar conteúdos online que ampliaram a discussão sobre os assuntos de maneira interativa usando a tecnologia a seu favor.

Quando identificar o ícone de QR-CODE, utilize o aplicativo Unicesumar Experience para ter acesso aos conteúdos on-line. O download do aplicativo está disponível nas plataformas: Google Play App Store

CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

Ao chegar em nossas casas, uma das primeiras coisas que fazemos é acender a luz do ambiente pressionando um interruptor, não é mesmo? E quando precisamos carregar a bateria de nosso smartphone, procuramos uma tomada para conectar logo o carregador. Isso já se tornou rotina para a maioria das pessoas.

A energia elétrica é resultado de uma potência utilizada durante um intervalo de tempo, potência essa que depende diretamente da tensão e da corrente elétrica.

Sabemos que a tensão de trabalho da maioria dos nossos dispositivos modernos opera entre 100 V e 240 V e que a frequência de operação é de 60 Hz no Brasil, porém, como a capacidade de condução de corrente de um condutor é dado em aproximadamente 3 A/mm², ficaria difícil para distribuir energia elétrica a todos diretamente no potencial de consumo de 127 V ou 220 V.

Para ser viável, a tensão de distribuição ocorre em tensões da ordem dos milhares de volts, como, por exemplo, 13,8 V, porém, para compatibilizar o uso doméstico e industrial nos potenciais padronizados, é necessário "transformar" o potencial de alta tensão em níveis adequados, papel dado ao transformador de distribuição, que atua rebaixando a tensão para que possamos ligar nossas lâmpadas, televisores, refrigeradores, carregadores de bateria etc.

E você, sabe como funciona um transformador e quais as limitações e características elétricas e mecânicas esta máquina possui?

Ou então, quando apertamos o botão liga no forno de micro-ondas para aquecer um alimento, observamos que ele começa a girar e permanece assim até o fim do ciclo previsto para seu preparo, ação possível graças ao uso de um motor acoplado a uma caixa de redução para diminuir a velocidade do motor e, ao mesmo tempo, multiplicar seu torque.

A indústria moderna utiliza motores de diversos tipos, tamanhos e capacidades, os quais são capazes de movimentar cargas, realizar tarefas de condicionamento de materiais, entre outras ações que se diferenciam conforme a necessidade do processo; seja no bombeamento de água ou na usinagem de metais ou processamento de alimentos, os motores elétricos movem a indústria ao redor do mundo.

E você? Sabe como funciona um motor elétrico e quais são as principais características que os permitem realizar esforço mecânico e como ele consegue converter corrente elétrica em movimento no eixo?

Além disso, temos a própria energia elétrica que utilizamos para todos os exemplos anteriores, que em sua maioria, é gerada a partir de máquinas elétricas capazes de induzir potenciais gerados por fluxos resultantes da circulação de corrente elétrica por condutores. Essas máquinas são os alternadores e geradores, que têm princípio funcional utilizado nas grandes usinas hidrelétricas espalhadas pelo mundo.

Mas você sabe como funcionam essas máquinas elétricas?
Pois bem, cada uma das máquinas citadas anteriormente opera sob princípios físicos que atuam sob os efeitos do movimento dos elétrons por meio de condutores, produzindo, assim, fluxo magnético que pode induzir em outros condutores diferença de potencial

capaz de atuar de acordo com sua filosofia de trabalho.
Podemos citar, por exemplo, um transformador, onde o enrolamento primário conectado à rede elétrica induz tensão no enrolamento secundário, no caso do motor de indução, os enrolamentos das bobinas do estator, assim como no primário de um transformador, conectadas à rede elétrica, induzem força eletromotriz no rotor capaz de provocar o movimento do eixo.
No caso do alternador, porém, uma fonte de tensão em corrente contínua produz fluxo magnético no rotor que entra em movimento graças a uma força externa produzida por uma máquina (motor à combustão interna), queda d'água etc., induzindo, assim, tensão alternada nos terminais do enrolamento do estator.
Esses exemplos são todos de máquinas elétricas que utilizam os princípios de conversão

eletromecânica de energia e iremos estudar em cada uma das unidades deste livro.
Verifique ao seu redor quantas máquinas elétricas e processos de conversão eletromecânica de energia você utiliza por dia, desde o momento em que acorda até quando vai dormir. Por exemplo:
De manhã você acende as luzes (pois acordou cedo e o sol ainda não apareceu totalmente), faz café em sua cafeteira elétrica, faz torradas na torradeira, pega o leite no refrigerador alimentado pela rede elétrica ininterruptamente, toma um banho quente no chuveiro elétrico, abre o portão eletrônico, que possui motor elétrico monofásico.
Mais tarde chega ao trabalho e liga o computador, que depende da rede elétrica alimentada por tensão gerada por meio de um alternador, na usina hidrelétrica. Ao final do trabalho, retorna para casa utilizando a luz da iluminação pública, que aciona as lâmpadas automaticamente na ausência de luz. Ao chegar em casa, acende as luzes novamente, toma outro banho, prepara o jantar, depois liga a televisão para assistir o programa de seu interesse.
Utilize este exemplo para descrever como é seu dia em função do uso de máquinas elétricas, mensurando quantas e qual a potência de cada uma.
Quando você já tiver relacionado todas as máquinas e processos de conversão de seu dia, reflita sobre cada um em termos de energia elétrica consumida, por exemplo: quantos banhos por dia você toma e quanto tempo você leva para realizar esta tarefa? Qual a potência de seu chuveiro? De posse desses dados, calcule a energia consumida em kwh por mês (aproximadamente).
Depois disso, descubra qual a potência do transformador de distribuição da sua rua ou condomínio e compare com a potência máxima que sua casa pode utilizar dele, levando-se em consideração a corrente de ruptura do disjuntor geral de seu quadro de distribuição e a tensão de sua tomada (127 V ou 220 V).

Os processos de conversão eletromecânicos de energia são os responsáveis por proporcionar o conforto do qual estamos acostumados, em tudo o que funciona com eletricidade, desde motores elétricos até smartphones.
Os geradores de energia elétrica são capazes de converter a energia mecânica de uma fonte de movimento em energia elétrica, alimentando, assim, cargas como empresas, residências, shoppings, hospitais, estações telefônicas etc.
Já os transformadores, são dispositivos desenvolvidos para viabilizar a energização das residências e indústrias, podendo rebaixar, isolar ou elevar os potenciais de tensão, adequados ao uso dos equipamentos em nossas casas, escolas, shoppings etc., enquanto que os motores elétricos são aqueles que são projetados para atuar sobre variáveis com seus eixos em movimento, transportando cargas, como, por exemplo, elevadores, esteiras de transporte industriais, gruas na construção civil, eletrodomésticos etc.
Todas as máquinas elétricas, girantes ou estáticas, operam de acordo com regras e conceitos físicos fundamentais que compartilham o uso da eletricidade e do magnetismo e auxiliam na solução de muitos problemas e necessidades da humanidade.

O conhecimento destas tecnologias permite ao estudante inferir sobre qual a melhor máquina e suas dimensões (elétricas e mecânicas) que serão aplicadas nos ambientes profissionais, que podem ir desde usinas de geração de energia elétrica, indústrias eletrônicas, empresas de instalação de equipamentos elétricos etc.
Observe o mapa conceitual de cada termo relacionado a este livro: transformador, alternador, motor de indução, máquina síncrona, motor de corrente contínua e bobina, convergindo para o termo “conversão eletromecânica de energia”.

Com base neste conhecimento, construa seu próprio mapa conceitual descrevendo com suas palavras como cada um dos termos funciona.
Ao longo das unidades deste livro, irá aprender sobre esses termos e muito mais.

CAMINHOS DE APRENDIZAGEM

1 — 13 — Princípios de Conversão Eletromecânica de Energia - Conceitos Fundamentais

2 — 37 — Máquinas Elétricas – Relações Elétricas Fundamentais

3 — 61 — Circuitos Magnéticos – Princípios

4 — 83 — Circuitos Magnéticos – Análise de Parâmetros

5 — 107 — Transformadores – Conceitos Fundamentais

6 — 127 — Transformadores - Dimensionamento

7 157
Introdução às Máquinas Elétricas Rotativas

8 181
Motores Síncronos e Assíncronos e Alternadores

9 201
Máquinas de Indução Polifásicas e Análise de Potência em Máquinas Elétricas

Princípios de conversão eletromecânica de energia - conceitos fundamentais

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Nesta unidade, o(a) estudante compreenderá os princípios físicos envolvidos na conversão eletromecânica de energia, abrangendo os estudos realizados por cientistas que, ao longo da história, definiram matematicamente o funcionamento de cada processo de conversão que permitem hoje o desenvolvimento das tecnologias mais utilizadas atualmente.

Você certamente já utilizou um eletrodoméstico em sua casa ou observou a partida de um carro quando a chave da ignição é girada. Mais do que isso, você já apertou o interruptor para acender a luz que ilumina o ambiente de sua casa diversas vezes. Não é difícil falar sobre exemplos do uso da eletricidade em nossas vidas, seja no aquecimento de um alimento, no banho quente, na iluminação da casa ou no eletrodoméstico que utilizamos para bater um bolo. Para todos estes exemplos, há um ou mais princípios físicos que explicam os fenômenos naturais utilizados para converter as formas de energia e viabilizar o desenvolvimento dos dispositivos que utilizamos na atualidade. E você, sabe explicar como cada processo eletromecânico funciona para que um motor entre em movimento ou um potencial elétrico seja convertido em outro, por exemplo?

Um veículo elétrico certamente é notável. Dotado de baterias recarregáveis, o dispositivo se desloca silenciosamente e possui torque tão significativo quanto ao de um carro convencional de motor à combustão interna.

Para que um carro elétrico possa entrar em movimento, um elemento motor o impulsiona e sua natureza é elétrica, ou seja, um motor que possui condutores elétricos que percorridos por corrente elétrica produzem campo magnético suficiente para produzir movimento em um eixo com a energia armazenada nas baterias.

É claro que toda a potência deste motor requer controle apropriado para que a velocidade do veículo varie de maneira suave e proporcione conforto aos ocupantes do carro, tarefa que é realizada por circuitos dedicados que manipulam a duração dos ciclos ativos de correntes que percorrem (por frações de segundo) as bobinas do motor, permitindo o incremento e o decremento da velocidade do eixo do motor.

A relação entre energia elétrica e mecânica existente no funcionamento de uma máquina elétrica (como no exemplo do motor de um carro elétrico) é uma aplicação prática de fenômenos descobertos por cientistas que, há centenas de anos, vêm buscando respostas para problemas da humanidade. Seus resultados permitiram o desenvolvimento de tantas tecnologias utilizadas na fabricação dos dispositivos que são fundamentais ao conforto que podemos desfrutar na atualidade.

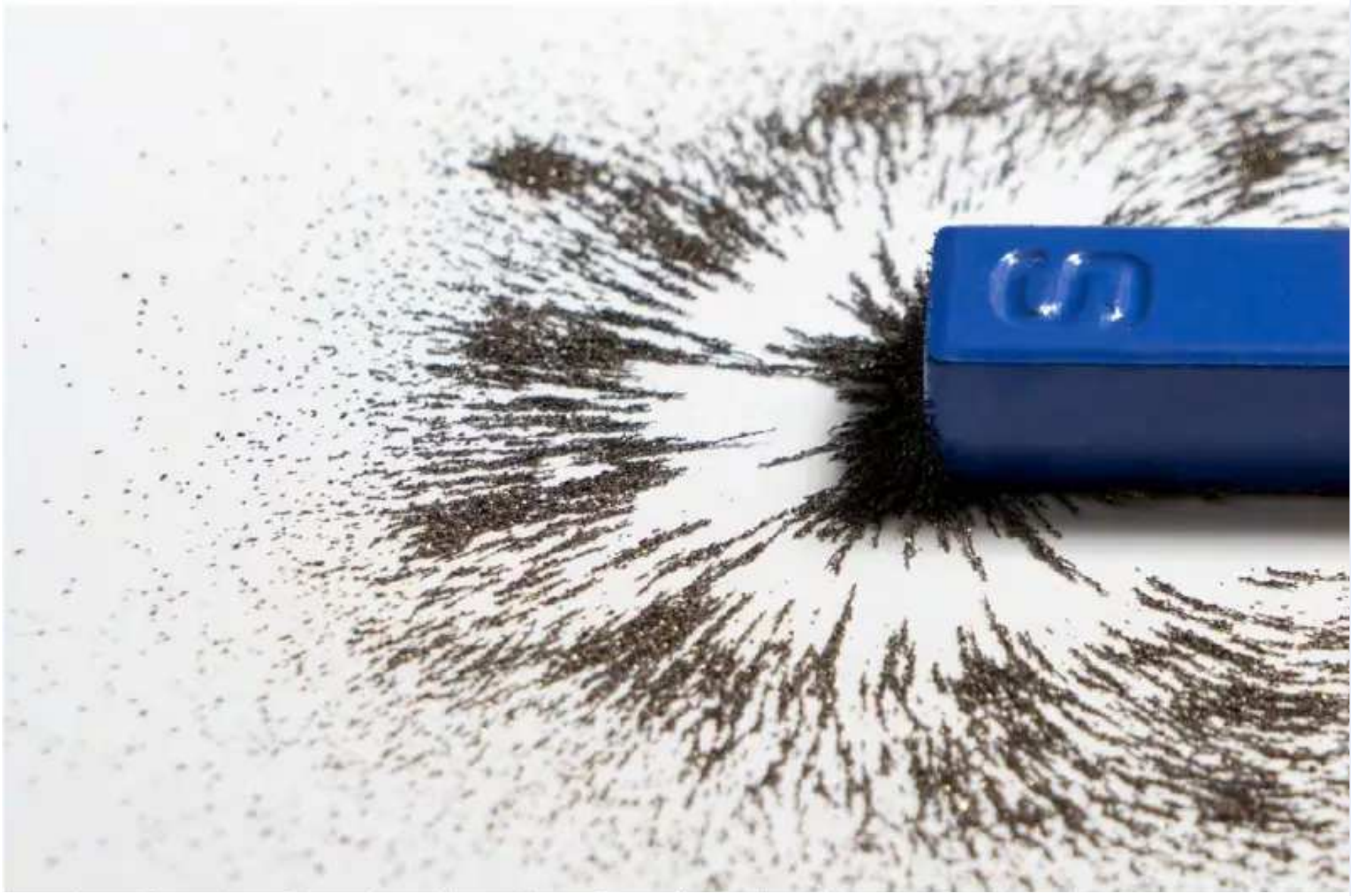
Homework

Olá, estudante, neste momento vamos fazer uma tarefa que consiste em identificar os principais dispositivos que utilizam fenômenos de conversão eletromecânica de energia. Para isso, você deve relacionar cada um dos exemplos dados na coluna da esquerda com seu princípio de funcionamento dado nas opções da coluna à direita. Caso tenha dúvidas sobre o nome de algum item da coluna da esquerda, pesquise pela sua definição na internet antes de associar os itens com a coluna da direita.

a) Transformador	( ) atrair metais ferrosos
b) Motor elétrico	( ) comutar cargas magneticamente
c) Relé eletromecânico	( ) acionar válvulas e travas elétricas
d) Eletroímã	( ) converter potencial de tensão
e) Solenoide	( ) produzir torque mecânico

Gabarito:

a) Transformador	(d) atrair metais ferrosos
b) Motor elétrico	(c) comutar cargas magneticamente
c) Relé eletromecânico	(e) acionar válvulas e travas elétricas
d) Eletroímã	(a) converter potencial de tensão
e) Solenoide	(b) produzir torque mecânico

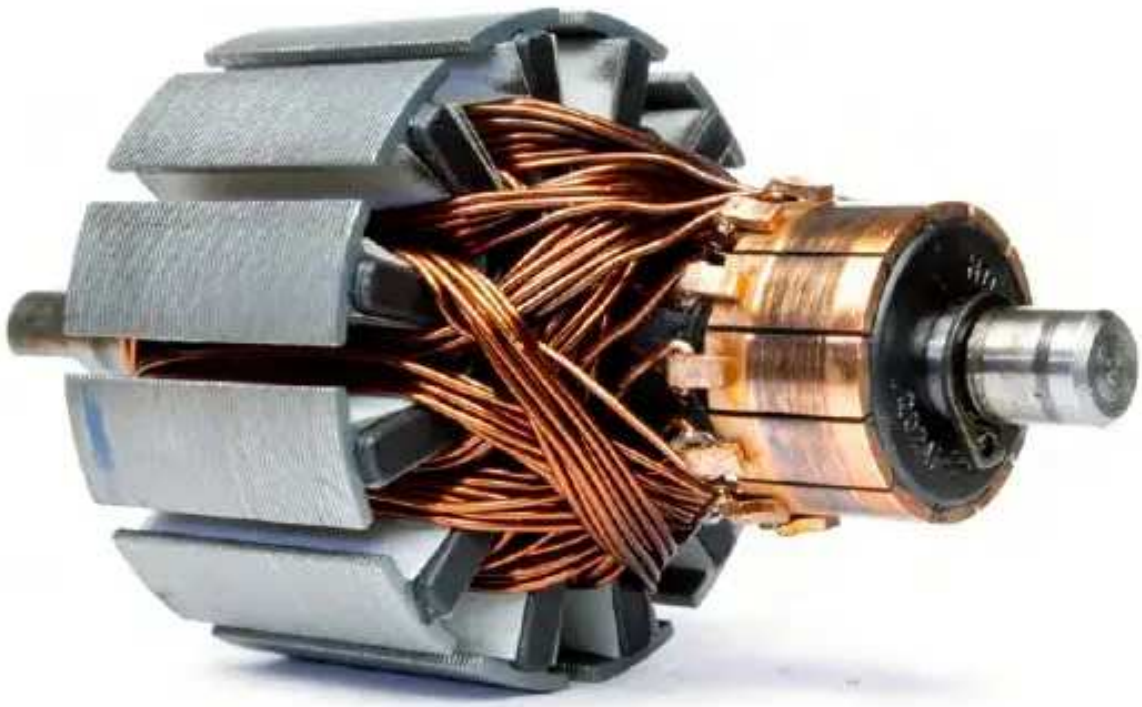


Olá, estudante! Convido você a realizar uma reflexão acerca de um tema muito importante de nosso estudo: o campo magnético de um ímã. Você sabe como se comportam as linhas de campo que se propagam em torno de um ímã? Saberia representar graficamente como o campo magnético (que é invisível) se comporta em torno de um ímã?

Para esta tarefa, utilize um ímã pequeno, uma folha de papel sulfite e uma quantidade próxima de uma colher de sopa de limalha de ferro. Inicie colocando o ímã sobre uma superfície plana, de preferência de madeira, depois coloque a limalha de ferro sobre o papel sulfite de forma concentrada no centro da folha e faça um leve espalhamento, depois aproxime lentamente a folha com a limalha do ímã de modo a observar o alinhamento das partículas de metal.

Quando o papel estiver muito próximo ao ímã, você deverá observar a formação de uma figura que representa as linhas de campo magnético em torno do elemento magnético. Com a formação produzida pela limalha de ferro, agora você poderá desenhar como se comporta o campo magnético e responder: como as linhas de indução se comportam em relação à distância da superfície do ímã? Para uma distância muito próxima do ímã e para uma distância de 5 cm de sua superfície, há variação de concentração de limalha? Por que?

DIÁRIO DE BORDO



Olá, estudante! Seja bem-vindo ao mundo da conversão eletromecânica de energia. Nesta unidade, iremos estudar os princípios físicos por trás dos fenômenos que permitem o movimento de eixos de motores, conversões entre tensões elétricas, comutação de cargas isoladas magneticamente, entre tantas outras tarefas tão úteis à humanidade.

Para iniciar nosso estudo, vou fazer uma pergunta: você sabe como é possível o eixo de um motor entrar em movimento? Quais são as variáveis responsáveis por este fenômeno? Como é que o movimento tem início ou mesmo qual o limite de força que esta máquina pode exercer? Do que depende tudo isso?

Você deverá ser capaz de encontrar as respostas para essas questões ao longo deste livro que se inicia pelas definições mais triviais. Nesta unidade, você irá entender a interdependência da eletricidade e do eletromagnetismo de maneira aplicada, resultando nas ações práticas que utilizamos para o funcionamento de máquinas e equipamentos industriais, eletrodomésticos, dispositivos médicos, transporte etc.

É importante iniciar o nosso estudo sobre os processos de conversão eletromecânica levando em consideração que vale a máxima de Lavoisier: «Na Natureza nada se cria e nada se perde, tudo se transforma». Com base nesta famosa frase, a natureza física dos dispositivos elétricos e eletromagnéticos deve ser analisada sempre levando em consideração que não se “cria” energia, e sim nós a convertemos de uma forma de energia para outra, assim como a queda d’água de uma represa que aciona as pás de uma turbina (Figura 1), convertendo a energia mecânica em energia elétrica e, posteriormente, um motor elétrico movimenta o eixo de uma máquina, convertendo a energia elétrica em energia mecânica.

Figura 1 - Turbinas de uma usina hidrelétrica - conversão de energia mecânica em energia elétrica

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma série de turbinas em uma usina hidrelétrica na qual é possível verificar apenas a parte externa e pontos de acesso aos operadores protegidos por passarelas e corrimões de segurança.

Há alguns princípios que determinam o funcionamento dos dispositivos, como exemplo, o princípio da conservação de energia, o princípio dos trabalhos virtuais e o princípio da reversibilidade. Este atua sobre a maior parte das tecnologias conhecidas, assim, quando um sistema de distribuição de energia elétrica utiliza um potencial de 13,8 kV enquanto em nossas residências recebemos 127 V ou 220 V, claramente podemos ver um exemplo de conversão de energia em termos de potenciais (ALUISIO; CRIVELLARI, 2010).

Ao mesmo tempo, quando observamos uma máquina síncrona que é acoplada ao eixo de um gerador diesel e excitada em seu elemento móvel, notamos o surgimento de diferenças de potencial sequenciadas em seus terminais, ou seja, ocorre a conversão de energia mecânica dada pelo eixo do motor diesel em energia elétrica na máquina síncrona. Exemplos como este são cada vez mais comuns, seja na conversão de potenciais quanto na conversão entre tipos diferentes de energia.

O rendimento (η) de uma máquina elétrica permite mensurar a taxa de conversão entre potência de entrada consumida pela máquina e a potência de saída aplicada em um processo de conversão eletromecânica de energia.

A potência de saída ($P_{saída}$) será sempre menor do que a potência de entrada ($P_{entrada}$) na grande maioria das máquinas elétricas (salvo os casos laboratoriais de elementos supercondutores), pois sempre haverá perdas de energia nos materiais condutores elétricos e acoplamentos dos elementos móveis (em máquinas dinâmicas), em forma de som e de calor. Assim, o rendimento é o quociente entre a potência de saída pela potência de entrada (ALUISIO; CRIVELLARI, 2010).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = [\%]$$

Equação 1

Este parâmetro leva em consideração a potência consumida pela máquina para realizar trabalho e a potência realmente transferida para a carga ou processo. Por exemplo, podemos citar o caso de um motor que consome 10 kW de potência da rede elétrica ($P_{entrada}$), porém, enquanto opera em 100% de seu regime de serviço, só transfere para a carga acoplada 85%, ou seja, 8,5 kW ($P_{saída}$), pois os outros 15% (1,5 kW) são dissipados pelo motor em forma de aquecimento, som, correntes parasitas etc.

Neste caso o rendimento fica:

$$\eta = \frac{8{,}5.10^3}{10.10^3}$$

$$\eta = 85\%$$

Com isso, podemos concluir que o motor exemplificado opera com 85% de rendimento, ou seja, suas tecnologias construtivas permitem ao equipamento converter 85% da energia consumida em energia realmente útil, sendo que os 15% restantes são dissipados na natureza em forma de som, calor etc.

O rendimento é também utilizado para avaliar a taxa de conversão de potência, tanto em máquinas estáticas quanto em máquinas dinâmicas (que possuem partes móveis). Além disso, há equipamentos eletrônicos, como conversores eletrônicos, que controlam a velocidade do eixo de um motor (inversores e soft starters), fontes de alimentação utilizadas em quase todos os equipamentos eletrônicos industriais e de uso doméstico, telecomunicações etc.

Um outro exemplo de rendimento aplicado a máquinas elétricas é o apresentado por um painel fotovoltaico utilizado para a conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica. Atualmente, um painel de boa qualidade oferece rendimento da ordem de 27%, ou seja, neste exemplo, de um total de 100% de energia solar incidido no painel, apenas 27% é convertido em energia elétrica. O restante da energia é dissipado em forma de calor e outras formas de energia que não são convertidas em energia útil.

Figura 2 - Sistema de painéis fotovoltaicos - dissipação de potência em forma de calor

Descrição da Imagem: esta figura mostra a mão de um operador segurando uma câmera termográfica que aponta para um arranjo de painéis fotovoltaicos no centro da tela e a imagem térmica é exibida em cores para representar a temperatura na superfície dos painéis.

Vamos agora analisar três elementos fundamentais da conversão eletromecânica de energia:

- Resistor;
- Capacitor; e
- Indutor.

Podemos afirmar que a análise de circuitos pode levar em consideração que todos os componentes de um circuito podem ser escritos na forma de componentes resistivo, capacitivo e indutivo.

O resistor elétrico, por exemplo, tem o papel de oferecer uma restrição à circulação de corrente e dissipa energia por efeito Joule (na forma de calor) sempre que houver corrente elétrica circulando pelo seu corpo. Este efeito resulta em uma queda de tensão (V_{Rx}) sobre sua estrutura que é proporcional ao produto da corrente (i) que circula pela sua resistência (Rx), no qual "x" é o índice do resistor ($R1, R2, R3... \quad ...Rn$), sendo assim apresentado na equação 2:

$$V_{Rx} = Rx.i = [V]$$

Equação 2

O valor de resistência ôhmica limita a intensidade de corrente de uma malha em um circuito, e esse consiste em uma característica importante deste elemento, pois depende de sua capacidade de dissipar calor dado pela sua potência nominal que pode variar entre diferentes resistores de mesmo valor de resistividade.

As componentes indutiva e capacitiva, porém, possuem uma característica diferenciada, que se refere à componente dinâmica de um circuito, ou seja, têm influência da frequência "f", que, ao variar, implica em uma variação da restrição à circulação da corrente com sinal oscilante, a qual conhecemos por reatância indutiva ($X_L = [\Omega]$) e a reatância capacitiva ($X_C = [\Omega]$) (ALUISIO; CRIVELLARI, 2010). A relação entre as reatâncias e frequência é dada por:

Reatância indutiva:

$$X_L = 2.\pi.f.L = [\Omega]$$

Equação 3

Na qual:

X_L = Reatância indutiva, medida em Ω.

$2.\pi$ = constante cíclica do sinal.

f = frequência do sinal, medida em Hz.

L = indutância medida em H $(Henry)$. Depende das características construtivas do componente (geometria, tipo de núcleo, tipos de materiais etc.).

Reatância capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{2.\pi.f.C} = [\Omega]$$

Equação 4

Na qual:

X_C = Reatância capacitiva, medida em Ω.

$2.\pi$ = constante cíclica do sinal.

f = frequência do sinal, medida em Hz.

C = capacitância medida em F $(Farad)$. Depende das características construtivas do componente (geometria, tipo de dielétrico, tipos de materiais etc.).

Perceba que tanto na componente indutiva quanto na capacitiva temos o termo reatância, que consiste em uma forma de restrição dinâmica à circulação de corrente. Esta restrição depende da frequência do sinal, de maneira direta na reatância indutiva e reversa para o caso da reatância capacitiva.

Ou seja, ao aumentar a frequência, a **reatância indutiva** torna-se maior, bloqueando sinais que tenham uma frequência acima de determinado valor. Já na **reatância capacitiva**, na medida em que a frequência aumenta, sua restrição diminui, ou seja, se a frequência tender a um valor muito alto, a reatância capacitiva irá tender a um curto-circuito.

O que podemos concluir até aqui é que a frequência de um sinal tem influência sobre o funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos, dado que, em alguns casos industriais, são utilizados bancos de capacitores em conjunto com motores elétricos a fim de corrigir o fator de potência que diminui quando os motores operam abaixo de sua capacidade, gerando potência reativa que pode implicar em multas por parte da concessionária de energia elétrica quando ultrapassa determinado limite.

A Figura 3 apresenta um exemplo de instrumento antigo analógico que indica o valor do fator de potência, no qual um ponteiro indica em uma escala graduada um valor entre 0,4 e 1 para reatância capacitiva e indutiva. O instrumento utiliza o termo "cos φ" que representa o fator de potência, sendo que mais próximo de 1 é melhor o fator de potência carga.

Figura 3 - Antigo instrumento de medição do fator de potência

Descrição da Imagem: Esta figura mostra um instrumento montado em painel de comando da máquina com indicador analógico e escala graduada, que tem o objetivo de indicar o fator de potência (cos φ). A escala do instrumento conta com o valor igual a 1 no centro, e à esquerda a reatância capacitiva e a direita a reatância indutiva, ambas variando de 1 a 0,4, com relação ao 1 do centro.

Em nosso estudo, iremos tratar como transdutores os dispositivos capazes de converter uma forma de energia em outra (FALCONE, 2018). Assim, quando analisamos o comportamento de um motor elétrico, é trivial que esta máquina recebe energia elétrica em sua entrada (terminais) e converte-a em energia mecânica em sua saída (eixo).

Figura 4 - Exemplo de processo de conversão eletromecânica de energia: energia elétrica convertida em energia mecânica
Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra um exemplo de processo de conversão eletromecânica de energia, na qual temos o texto "Energia Elétrica" sendo introduzido na entrada de um retângulo intitulado de Motor Elétrico e em sua saída há o termo "Energia Mecânica".

A representação de um transdutor eletromecânico pode ser dada na Figura 5:

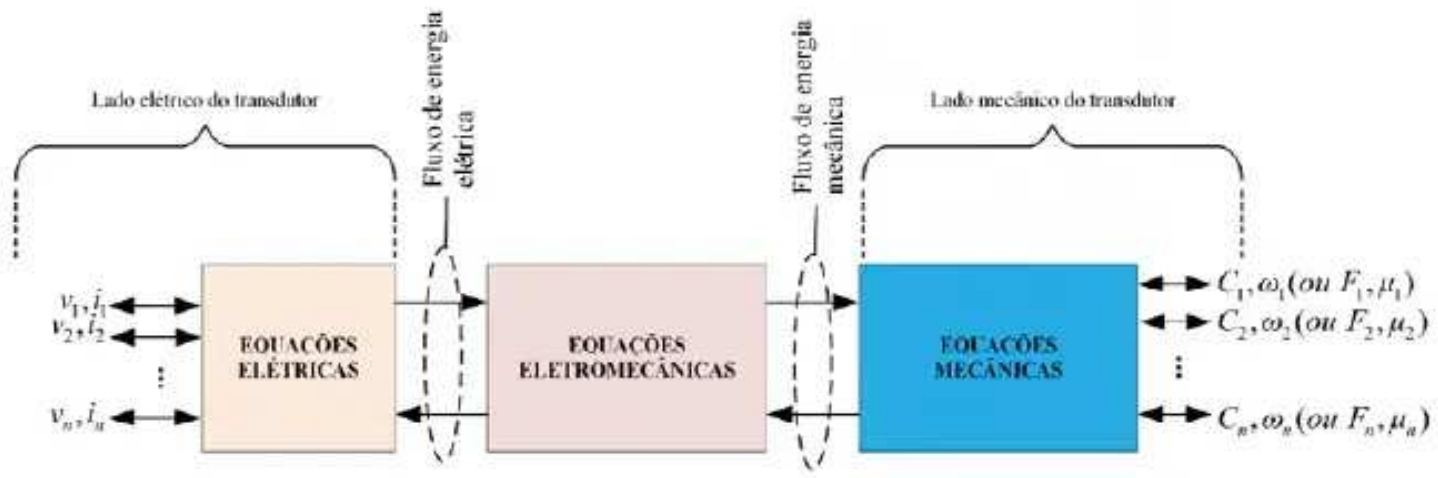


Figura 5 - Representação em diagrama de blocos de um transdutor / Fonte: adaptada de Falcone (2018, p. 26).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação em diagrama de blocos de um transdutor contendo três caixas de texto alinhadas e interligadas por setas representando pela caixa da esquerda as equações elétricas, pela caixa do meio as equações eletromecânicas e pela caixa da direita as equações mecânicas. Além disso, há textos na entrada da caixa da esquerda interligados por setas que representam as entradas (tensão e corrente) e também há textos na saída da caixa da direita onde elementos mecânicos como o conjugado e a velocidade angular são representados. Entre as caixas da esquerda e a do meio há uma seta indicando que ocorre o fluxo de energia elétrica entre elas e entre a caixa do meio e a caixa da direita, há um fluxo de energia mecânica.

Podemos observar na Figura 5 as tensões e as correntes adentrando o bloco de equações elétricas ($v_1, i_1; v_2, i_{2;\ldots}\ \ldots v_n, i_n$). Além disso, temos equações eletromecânicas e equações mecânicas, estas últimas representam a conexão do transdutor às informações elétricas que devem ser convertidas para possível interpretação do sistema de controle.

As equações elétricas em um intervalo de tempo infinitesimal podem ser expressas por (FALCONE, 2018):

$$dE_{elet} = \sum_{i=1}^{n} v_i i_i \ dt$$

Equação 5

As equações do lado elétrico são definidas pelas leis de *Kirchhoff* das correntes e das tensões, as quais são iguais a zero tanto na somatória das correntes quanto na somatória das tensões.

Já do lado mecânico do transdutor, temos a presença de variáveis que traduzem a energia aplicada ao acoplamento mecânico dado pelos termos conjugado (C) e velocidade angular (ω). Contudo, caso o movimento mecânico na saída do transdutor não for rotacional e sim translacional (movimento de translação), as variáveis correspondentes seriam força (F) e velocidade de translação (α), conforme representado matematicamente (FALCONE, 2018) nas equações 6 e 7.

Para movimento de rotação, temos:

$$dE_{mec} = \sum_{i=1}^{n} C_i \omega_i \ dt$$

Equação 6

Para movimento de translação, fica:

$$dE_{mec} = \sum_{i=1}^{n} F_i \mu_i \ dt$$

Equação 7

Para estabelecer a relação matemática entre o meio externo e as interações mecânicas do transdutor, utilizamos as equações dadas pelas leis de Newton da mecânica clássica, em que a somatória das forças é considerada nula, ou seja:

$$\sum F = 0 \ \text{(Movimentos de translação)}$$

ou

$$\sum C = 0 \ \text{(Movimentos de rotação)}$$

Os fenômenos de conversão eletromecânica ocorrem na parte central do diagrama de blocos da Figura 5, nos quais os processos de conversão eletromecânica são regidos pelas equações de forças eletromotrizes (f.e.m.), campos elétricos, campos magnéticos, leis de Ohm (para resistência elétrica), além de variáveis mecânicas, como por exemplo, forças mecânicas, velocidades, entre outras.

Um exemplo de transdutor eletromecânico que todas as pessoas já devem ter observado é o alto-falante. Este tipo de dispositivo há muito tempo realiza a operação de converter a energia elétrica aplicada em seus terminais em energia mecânica, por meio de um acoplamento magnético que desloca seu cone para frente e para trás, de acordo com o comportamento do sinal aplicado.

Figura 6 – Alto-falantes: conversão eletromecânica envolvida no processo de transdução do sinal elétrico em pressão sonora (perturbação mecânica)

Descrição da Imagem: esta figura mostra dois alto-falantes posicionados no centro da tela com fundo branco, representando transdutores de sinais elétricos em sinais mecânicos.

REALIDADE AUMENTADA

TURBINA DE USINA HIDRELÉTRICA

É importante levar em consideração que, em um cenário real, todos os processos de conversão de energia entre uma forma para outra implicam em perdas de alguma natureza, podendo ser na forma de calor por efeito Joule ou na forma de perdas magnéticas pelos efeitos da histerese ou correntes de Foucault, atrito entre partes móveis, entre outras formas que se aplicam em cada caso, de acordo com a natureza do processo de conversão eletromecânica de energia.

A classificação dos sistemas eletromecânicos pode ser dada da seguinte maneira (FALCONE, 2018):

- Sistemas Eletromecânicos de Energia (SEE) e
- Sistemas Eletromecânicos de Controle (SEC).

Os Sistemas Eletromecânicos de Energia compreendem o conjunto de dispositivos normalmente de potência, que consistem em acionar grandes cargas com consumo de energia elevado, sendo, por exemplo, os motores e os atuadores.

Já os Sistemas Eletromecânicos de Controle envolvem outros agrupamentos de dispositivos com funções que se adequam a analisar e atuar sobre parâmetro, tais como a resposta em regime transitório, a capacidade de amplificação, a resposta em frequência, entre outros que priorizam a aquisição de dados necessários para que o controle possa ser estabelecido, uma vez que: "Não se pode controlar o que não se pode mensurar."

Embora haja uma definição para classificar cada sistema eletromecânico, alguns casos podem se sobrepor, uma vez que entendemos a complexidade da interpretação acerca de alguns casos nos quais a parte que controla deve atuar juntamente com grandes consumos de potência.

Ao analisarmos um sistema físico de conversão eletromecânica de energia, podemos obter a função de transferência dele a partir do cálculo da relação entre a transformada de Laplace da saída pela transformada de Laplace da entrada dele. Deste modo, a partir desta função de transferência, é possível entender o comportamento desta conversão aos diferentes tipos de estímulos aplicados em sua entrada e amostrados na saída.

"Denomina-se função de transferência G(s) de um sistema linear, de parâmetros concentrados, invariantes no tempo e de entrada e saída únicas a relação entre as transformadas de Laplace da variável de saída e da variável de entrada, supondo às condições iniciais nulas."

Fonte: Maya (2014, p. 46).

Um sistema considerado como linear permite a aplicação do princípio da superposição, pois a natureza da sua resposta não é alterada quando a intensidade dos estímulos de entrada varia em amplitude, uma vez que a resposta de um sistema linear é proporcional à excitação aplicada em sua entrada (FALCONE, 2018).

Embora um transformador não seja um elemento eletromecânico, este dispositivo é estudado em Eletromecânica, pois os princípios aplicados deste componente são a base para o estudo de outros dispositivos como motores, por exemplo, dado às propriedades da indução eletromagnética presentes no processo de transformação.

Figura 7 - Transformador - elemento estático com conversão de potencial de tensão

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um transformador de pequeno porte utilizado com frequência em aparelhos eletrônicos para rebaixar a tensão. É possível identificar as chapas de aço-silício que compõe o núcleo e os enrolamentos de cobre do primário (abaixo) e do secundário (acima).

Para as fontes de alimentação lineares, há uma particularidade relacionada ao uso de transformador no estágio de entrada e que se faz necessário introduzir o conceito neste momento para referência em estudos futuros deste livro. Os transformadores monofásicos são amplamente utilizados em diversas aplicações tais como:

- Elevar sinais (transformador elevador);
- Rebaixar sinais (transformador rebaixador);
- Acoplar sinais (transformador de acoplamento).

Em algumas aplicações especiais, existem terminologias que remetem a transformadores isoladores (que isolam o sinal de entrada do sinal de saída, trocando sua referência) e autotransformadores, que são utilizados para elevação ou rebaixamento de sinais (KOSOW, 2005).

O objetivo do nosso estudo é entender os fenômenos que ocorrem no processo de conversão de energia descoberto por Faraday em 1831 (KOSOW, 2005), no qual uma tensão era induzida em um condutor metálico e este era cortado por linhas de campo magnético.

Este processo permitiu a pesquisa da maior parte dos fenômenos que relacionam a eletricidade e a construção da maioria dos dispositivos elétricos que temos na atualidade, pois desencadeou as linhas de pesquisas da indução eletromagnética. Baseado no conceito da indução eletromagnética, o transformador é composto basicamente de um enrolamento primário e um enrolamento secundário, nos quais a tensão de entrada é aplicada no primário e a tensão de saída é induzida no secundário (KOSOW, 2005), conforme mostrado na Figura 8.

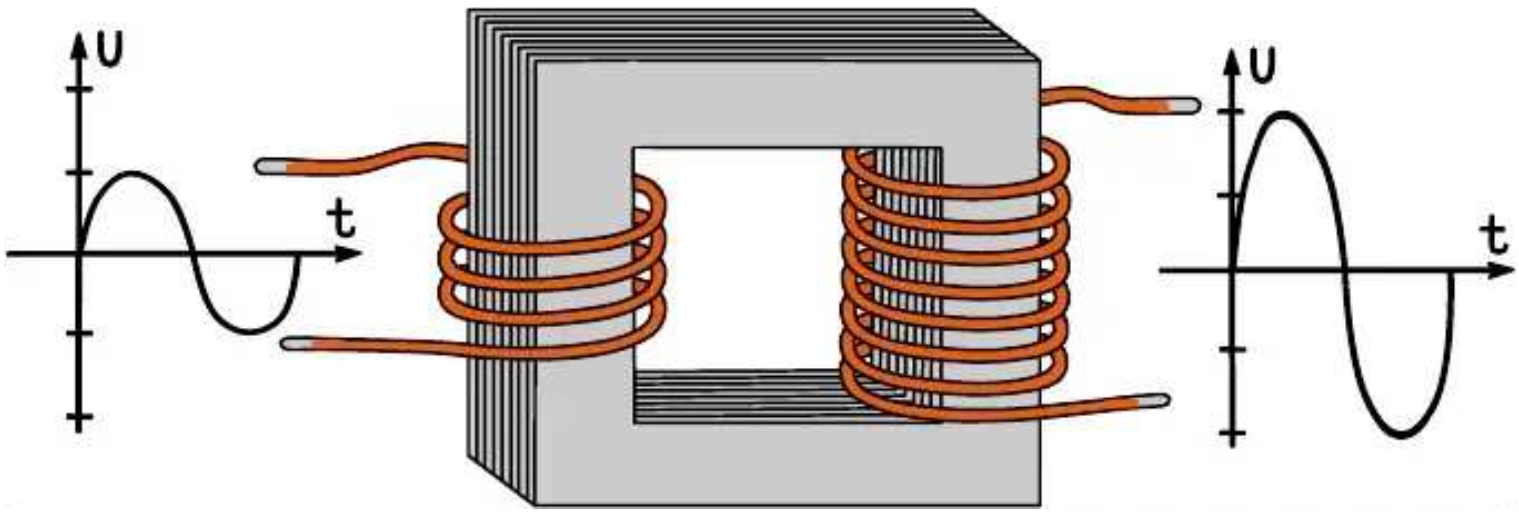


Figura 8 - Transformador monofásico

Descrição da Imagem: esta figura mostra o desenho de um transformador com a representação do sinal de entrada senoidal com amplitude igual a 1 e amplitude na saída igual a 2.

A estrutura que permite o enrolamento dos condutores isolados de cobre é denominada núcleo e, no caso do exemplo dado na Figura 9, refere-se a um núcleo de chapas de aço-silício, comumente utilizado em projetos de fontes lineares.

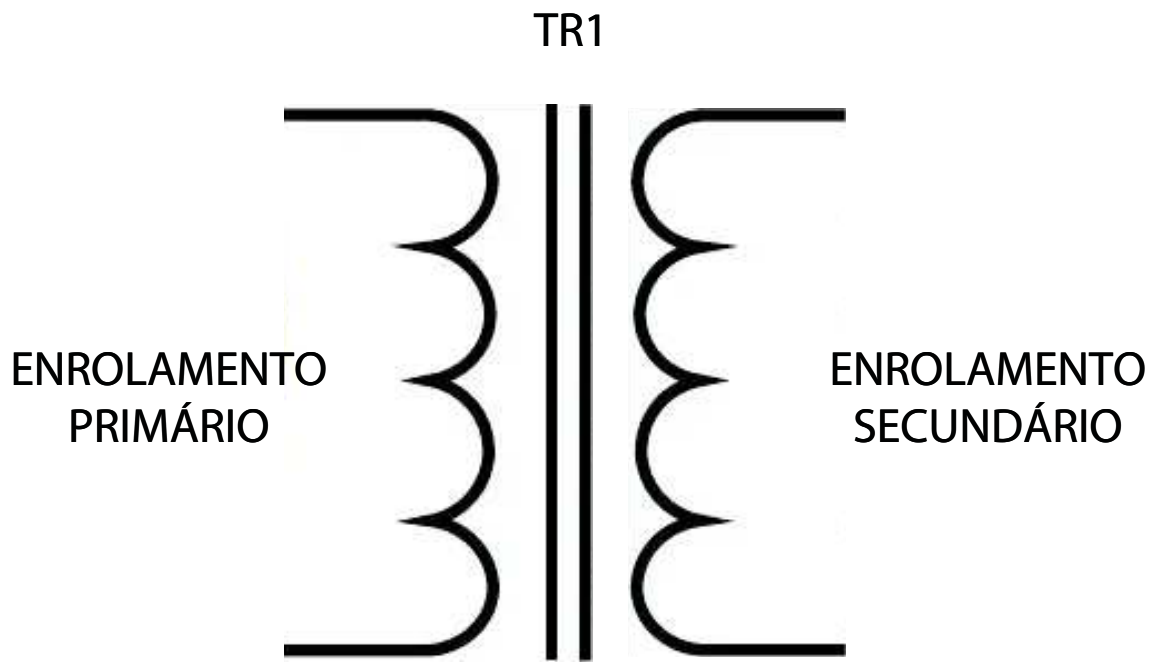


Figura 9 - Transformador monofásico: diagrama elétrico / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra um diagrama representativo de um transformador, no qual à esquerda está o enrolamento primário e sua bobina, ao centro a representação de seu núcleo com duas barras paralelas verticais representando núcleo de chapas de aço-silício e à direita a bobina do enrolamento secundário.

Os transformadores são máquinas estáticas que revolucionaram a eletrônica e viabilizaram o funcionamento de diversos equipamentos que utilizamos até hoje. Você sabe como eles funcionam e são fabricados? Nesta pílula de aprendizagem, iremos falar a respeito dessa fantástica tecnologia que permite o uso de nossos eletrodomésticos e dispositivos eletrônicos que trazem o conforto para nossos lares e ambientes profissionais.

Quando um sinal alternado $U(t)$, com frequência f, é aplicado no enrolamento primário de um transformador ($TR1$), uma tensão $U'(t)$, de mesma frequência, é induzida no seu enrolamento secundário, graças ao efeito da indução eletromagnética que flui por meio do núcleo (de chapas), e este é que conduz o fluxo magnético ϕ produzido pela circulação de corrente i no condutor do enrolamento primário, conforme representado na Figura 10.

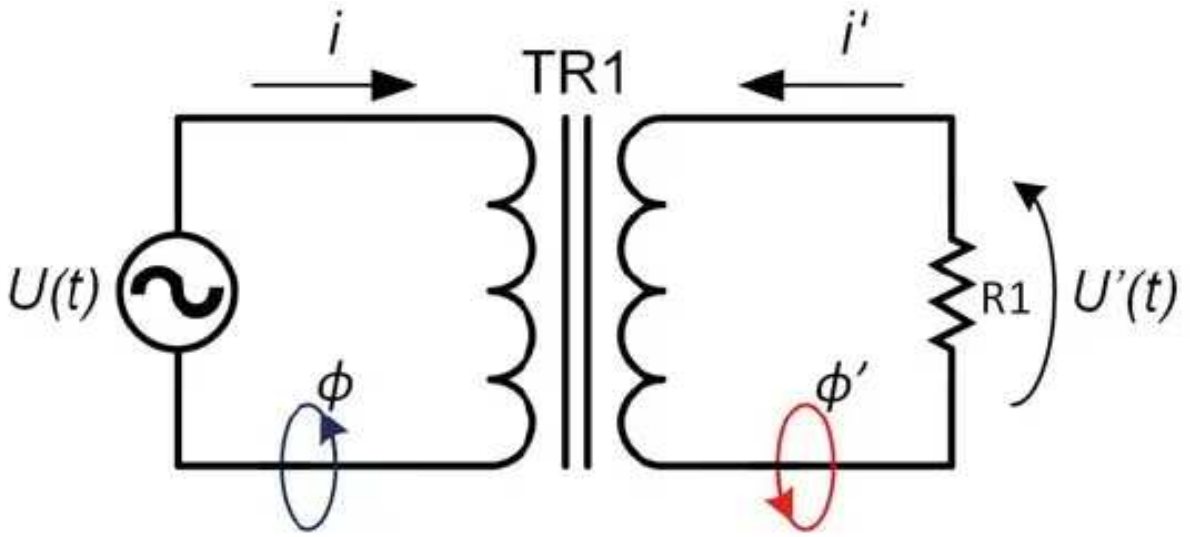


Figura 10 - Transformador monofásico: tensão induzida / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra um diagrama elétrico de um transformador de núcleo de aço-silício com o enrolamento primário conectado à rede elétrica com tensão U(t) e o surgimento da corrente "i" no enrolamento primário e, como consequência disso, o surgimento de fluxo magnético "fi" (φ). O único enrolamento secundário é conectado a uma carga resistiva "R1", onde há o surgimento da tensão induzida "U'(t)" e a corrente "i'", que consequentemente produz o fluxo magnético "fi'" (φ').

O fluxo magnético ϕ do enrolamento primário induz a força eletromotriz (ou diferença de potencial) $U'(t)$ no enrolamento secundário, que ao ser conectada a uma carga $R1$, permite a circulação da corrente i', e este, por sua vez, produz o fluxo ϕ' (KOSOW, 2005). Para um transformador ideal (ou sem perdas), a relação de potências se faz verdadeira:

$$P_P = P_S$$

Equação 8

Em que P_P é a potência do enrolamento primário e P_S é a potência do secundário do transformador. Sabendo que:

$$P = V.I$$

Equação 9

$$V_P \times I_P = V_S \times I_S$$

Equação 10

Em que: V_P é a **tensão** no enrolamento **primário**, I_P é a **corrente** no enrolamento **primário**, enquanto que V_S é a **tensão** no enrolamento **secundário**, I_S é a **corrente** no enrolamento **secundário**. De acordo com a Figura 10, adote as relações de igualdade:

$$U(t) = V_P$$

Equação 11

$$U'(t) = V_S$$

Equação 12

$$i = I_P$$

Equação 13

$$i' = I_S$$

Equação 14

Assim, quando a corrente do secundário do transformador variar, para sustentar a igualdade dada na *Equação 8*, haverá a necessidade de compensar essa variação por meio de ϕ e consequentemente i, no enrolamento primário de $TR1$, uma vez que mantém constante $U(t)$ (MALVINO, 1995).

Este princípio nos permite entender a utilização de fusíveis em série com o enrolamento primário do transformador, para que quando uma variação na corrente do enrolamento secundário seja limítrofe, não comprometer o projeto do transformador (MALVINO, 1995).

A relação de tensão nos enrolamentos depende do número de espiras deles, que são calculadas com base em um parâmetro conhecido como "relação de espiras por volt" ou simplesmente "espiras/volt". Este parâmetro é calculado conforme o projeto do transformador e depende do tipo e dimensões do núcleo utilizado (KOSOW, 2005), assim a tensão desejada para cada enrolamento define o número de espiras, conforme Equação 11:

$$N_x = (espiras / volt) \times V_{enrolamento}$$

Equação 15

Em que, N é o número de espiras e x é o enrolamento em questão, podendo ser enrolamento primário ou secundário (um mesmo transformador pode ter múltiplos enrolamentos primários ou secundários). Assim, para o caso de um enrolamento primário, o número de espiras (N_P) seria:

$$N_P = (espiras / volt) \times V_P$$

Equação 16

Ou, para o caso de um enrolamento secundário, o número de espiras (N_S) fica:

$$N_S = (espiras / volt) \times V_S$$

Equação 17

Exemplo numérico: suponha um transformador monofásico com as características: $V_P = 127\ V$, relação de transformação de 10:1, $espiras\ /\ volt = 7,3\ espiras$, fica:

- Cálculo do **número de espiras do enrolamento** primário do transformador (N_P):

$$N_P = espira\ /\ volt \times V_P$$
$$N_P = 7,3 \times 127$$
$$N_P = 927,1\ espiras$$
$$N_P \approx 928\ espiras$$

- Cálculo do número de espiras do enrolamento secundário do transformador (N_S):

Como a relação de transformação é de 10:1, então temos que o transformador é rebaixador em uma escala de 10 vezes, ou seja, se a tensão de entrada (enrolamento primário) é de 127 V, a tensão na saída (enrolamento secundário) será de:

$$VS = \frac{V_P}{10}$$
$$V_S = \frac{127}{10}$$
$$V_S = 12,7\ V$$

Substituindo na Equação 13, fica:

$$N_S = espira\ /\ volt \times V_S$$
$$N_S = 7,3 \times 12,7$$
$$N_S = 92,7\ espiras$$
$$N_S \approx 93\ espiras$$

A análise do dimensionamento de transformadores envolve um estudo mais amplo em torno dos materiais utilizados pelo equipamento, entretanto, estes detalhes e muito mais iremos abordar nas próximas unidades deste livro.

O conhecimento de transformadores permite ao estudante analisar os vários dispositivos que operam com o princípio da conversão eletromecânica de energia e, além disso, entender as mais importantes limitações existentes em motores elétricos que são amplamente aplicados em ambientes profissionais industriais, por exemplo.

O conhecimento dos fundamentos de conversão eletromecânica de energia permite ao profissional tomar decisões importantes sobre qual a melhor tecnologia empregar, levando em consideração a sustentabilidade e viabilidade dada ao funcionamento de cada dispositivo.

Olá, caro(a) estudante! Chegamos em uma etapa de nosso estudo onde convido você a fixar os principais conceitos que estudamos até aqui e, para isso, gostaria de convidá-lo a interpretar o mapa conceitual dado na Figura 11 - Mapa conceitual da Unidade 1 a seguir:

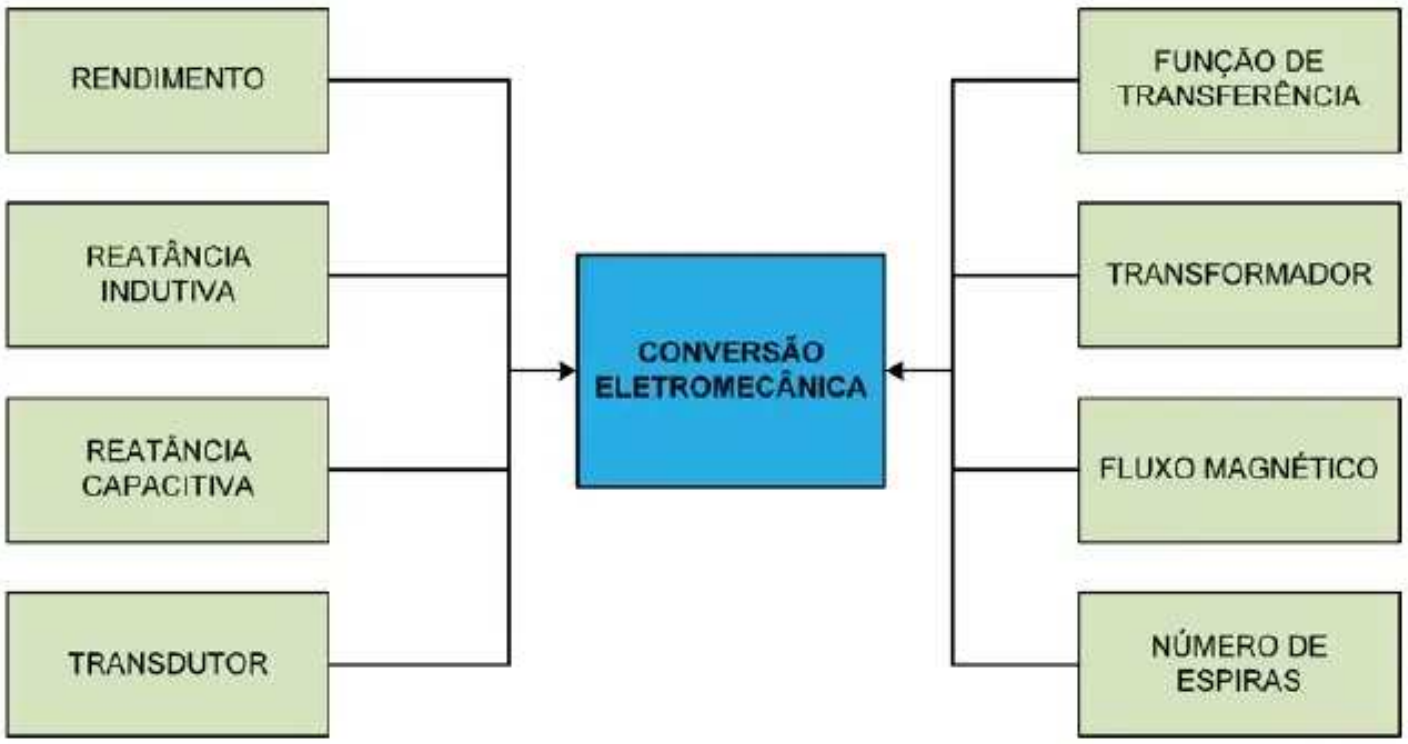


Figura 11 - Mapa conceitual da Unidade 1 / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma estrutura de tópicos que estão dispostos dentro de 8 retângulos com os termos destaques estudados nesta unidade (RENDIMENTO, REATÂNCIA INDUTIVA, REATÂNCIA CAPACITIVA, TRANSDUTOR, FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA, TRANSFORMADOR, FLUXO MAGNÉTICO E NÚMERO DE ESPIRAS). Estes 8 retângulos se interligam a um retângulo disposto no centro da imagem com o termo inscrito "CONVERSÃO ELETROMECÂNICA".

MAPA MENTAL

Com base no mapa conceitual da Figura 11, construa o seu mapa conceitual explicando a definição de cada um dos termos abordados associando a um exemplo real dos ambientes profissionais de engenharia.

MAPA MENTAL

1. **Em uma indústria de transformadores, um cliente encomendou um transformador para rebaixar a tensão de entrada em 220 V para saída com 127 V necessários para alimentar uma carga de 10 A. Sobre as características deste transformador, é correto afirmar que:**

   a) A corrente no enrolamento primário do transformador quando a carga estiver a 100% será de 12 A.

   b) A corrente no enrolamento primário do transformador quando a carga estiver a 50% será de 50 mA.

   c) A corrente no enrolamento primário do transformador quando a carga estiver a 100% será de 5,77 A.

   d) A corrente no enrolamento primário do transformador quando a carga estiver a 20% será de 800 mA.

   e) A corrente no enrolamento primário do transformador quando a carga estiver a 100% será de 2,67 A.

2. **Os transdutores podem realizar a conversão de um tipo de energia em outro, assim, um transdutor piezelétrico tem aplicações em converter uma variação de pressão (mecânica) em sua superfície (entrada) em um sinal elétrico em sua saída. Sobre os transdutores, assinale a alternativa correta:**

   a) Um transdutor pode ser representado por um bloco contendo as equações eletromecânicas e receber os sinais de entrada passando por um conversor analógico-digital, pois há a necessidade de conversão de sinais em todos os transdutores.

   b) Um encoder incremental é um transdutor, pois converte uma informação de posição para um sinal elétrico, retroalimentando a unidade de controle do sistema.

   c) Uma válvula servo-pilotada é um transdutor que converte energia elétrica em energia mecânica, pois como não é um atuador, este equipamento realiza ação regenerativa.

   d) Um alto-falante é considerado um transdutor, pois seu acoplamento magnético converte energia mecânica em energia luminosa dentro da bobina e, por este motivo, o movimento do cone.

   e) Um transdutor eletromecânico é aquele que opera com a geração de energia elétrica, utilizando-se células de efeito Peltier.

AGORA É COM VOCÊ

3. **Os sistemas eletromecânicos são compostos por uma parte que se relaciona com a potência e outra parte com o controle, assim, analisar indicadores de desempenho está relacionado com a etapa de controle dele, porém, muitos sistemas complexos podem ter etapas de controle e potência agregadas, o que dificulta sua identificação. Sobre os sistemas eletromecânicos, assinale a alternativa correta.**

   a) Os Sistemas Eletromecânicos de Controle estão associados aos sistemas com resposta em regime transitório.

   b) Os Sistemas Eletromecânicos de Energia compreendem o conjunto de dispositivos normalmente de pequenos sinais, que consistem em controlar o consumo de energia da carga.

   c) Os Sistemas Eletromecânicos correspondem aos elementos transdutores de potência e massa.

   d) Os Sistemas Eletromecânicos de controle destinam-se exclusivamente ao controle remoto de equipamentos e à telemetria.

   e) Os Sistemas Eletromecânicos de energia são compostos por itens de hardware e software com sinais arbitrários, sem realimentação.

AGORA É COM VOCÊ

Máquinas Elétricas – Relações Elétricas Fundamentais

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Nesta unidade, você terá a oportunidade de aprender sobre os fundamentos elétricos necessários ao entendimento do funcionamento das máquinas elétricas, tais como: componentes resistivas, indutivas e capacitivas inerentes aos fenômenos elétricos de tensão, corrente e potência em cada um dos elementos

A rede de distribuição utiliza potenciais de alta tensão para enviar a energia elétrica até as nossas residências e indústrias. Contudo, para nossa utilização, o valor corresponde à de baixa tensão, da ordem de 127 V ou 220 V. Como é possível realizar esta conversão entre os potenciais de tensão? Qual tipo de dispositivo é responsável por este processo e como ocorre este processo?

Em nossas residências, normalmente utilizamos eletrodomésticos que são projetados para utilização em redes de 127 V ou 220 V, como, por exemplo, refrigeradores, aparelhos de TV, computadores etc. No entanto, os circuitos internos da maioria dos equipamentos eletrônicos operam com níveis de tensão em torno de poucos volts: 12 V, 5 V, 3,3 V, 1,8 V, por exemplo.

Para adequar os níveis de tensão que serão utilizados por um eletrodoméstico ou equipamento industrial eletrônico, é necessário converter o potencial de entrada (de 127 V ou 220 V) para um valor que possa ser utilizado pelos seus circuitos internos. Neste caso, o transformador é o equipamento que atua com este objetivo: converter a tensão de entrada para valores desejados, rebaixando ou elevando seu valor conforme a necessidade.

Atualmente, existem conversores estáticos que apresentam a característica de realizar esta operação eletronicamente, contudo, os primeiros equipamentos capazes de realizar esta tarefa foram os transformadores, que por meio de seus enrolamentos, podem adequar níveis de tensão entre a entrada e a saída de acordo com a necessidade de uma carga a ser alimentada.

Podemos analisar o comportamento de um transformador trifásico disponível na rede de distribuição de nossa cidade que recebe potenciais em alta tensão (13,8 kV, por exemplo) e converte em sua saída para potenciais de 220 V e 127 V. Este equipamento é dotado de enrolamentos de cobre em torno de um núcleo de aço que isolados são imersos em um óleo mineral que possui a função de trocar calor, por meio das aletas da carcaça metálica, a fim de garantir o isolamento e também extinguir possíveis arcos voltaicos que possam surgir internamente.

Figura 1 - Transformador de distribuição instalado em um poste

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um transformador de distribuição de energia elétrica instalado no alto de um poste, no qual as três fases presentes nos condutores de alta tensão estão conectadas na entrada do transformador, passando pelos elementos de proteção (fusíveis). As três saídas em baixa tensão estão disponíveis na saída do transformador em condutores de descida isolados.

A potência da carga a ser alimentada determina a potência do transformador a ser utilizado, uma vez que este tipo de máquina elétrica opera com reatância indutiva, variável que deve ser controlada para maximizar a qualidade da energia e eficiência energética. Contudo, qual seria a capacidade de potência em kW do transformador que alimentaria uma residência?

Para responder a esta pergunta, podemos iniciar a busca pelo valor impresso no disjuntor do padrão de entrada em nossa residência, pois é dado em função deste elemento, a corrente de atuação do disjuntor, que começamos nosso estudo.

Além disso, um transformador também pode ser utilizado para converter o potencial da rede de 127 V ou 220 V para alimentar um dispositivo que requer 12 V para funcionar. Assim, temos os transformadores de pequeno porte que operam com pequenos valores de potência, de até 100 VA.

Estes transformadores pequenos normalmente são alocados dentro do próprio eletrodoméstico ou equipamento industrial mais antigos ou, em alguns casos, dentro de pequenas caixas que podem

ser conectados na tomada de uma residência e fornecer o potencial desejado.

Como você pôde observar, há muito o que aprender sobre os transformadores, não é mesmo?

Pensando nisso, você irá realizar uma atividade que lhe permitirá entender melhor a relação entre a carga alimentada e a capacidade do transformador utilizado.

Para esta atividade, você deverá levar em consideração dois dados:

1º: Acesse sua conta de luz dos últimos 6 meses e calcule a média de consumo de potência em kW. Com este dado, você saberá o quanto de potência o transformador teria que atender se alimentasse apenas a sua residência.

2º: Caso você resida em um bairro com várias casas ou um prédio com vários apartamentos, descubra a quantidade de residências ou apartamentos que são alimentados pelo transformador de sua rua ou condomínio ou mesmo na sua propriedade rural, se for o caso.

Com essa informação, você será capaz de concluir sobre a capacidade mínima de um transformador para atender à demanda de carga instalada.

Vamos analisar o caso de uma residência com a seguinte carga:

1 refrigerador de 250 W
10 lâmpadas de 20 W cada
1 chuveiro de 6000 W
1 forno de micro-ondas de 1000 W

Todos esses dispositivos devem ser alimentados em 127 V em uma instalação monofásica.

Pela soma dessas potências temos um total de 7450 W. Como a tensão é de 127 V, a corrente no condutor fase que alimenta a residência é de 58,66 A, ou seja, se todos os dispositivos estivessem ligados ao mesmo tempo, a corrente nos ramos do condutor de entrada seria de 58,66 A, valor que define a área do condutor de cobre utilizado e o disjuntor para proteger a instalação elétrica.

E se, no caso desta residência, a tensão e os dispositivos todos passassem a 220 V, qual seria o valor da corrente no condutor de entrada? Haveria diferença em termos de potência para o transformador que alimenta a residência?

DIÁRIO DE BORDO

Os transformadores são exemplos de máquinas elétricas que possuem ampla aplicação em sistemas de distribuição de energia elétrica (iremos estudar especificamente na Unidade 4 deste livro), nos circuitos de equipamentos eletrônicos para aplicaçõ es diversas, conversão de sinais, entre outros.

Para entendermos os princípios relacionados às máquinas estáticas, iremos estudar nesta unidade alguns fundamentos matemáticos necessários ao estudo dos dispositivos resistivos, indutivos e capacitivos e a dinâmica das componentes de tensão, corrente e potência aplicada em cada um.

Para começar, devemos iniciar nosso estudo pelos elementos elétricos e a **resistência** elétrica é, sem dúvidas, aquela que está presente sempre quando estudamos a eletricidade, pois com a circulação de corrente, temos a dissipação de calor e a componente resistiva envolvida nos condutores metálicos deve ser levada em consideração.

Na prática, a resistência elétrica está presente intrinsecamente em condutores elétricos e também em elementos de aquecimento, como no caso de resistências de fornos industriais, que são exemplos de máquinas elétricas estáticas.

O controle de potência da resistência de aquecimento pode ser feito a partir de dispositivos que utilizam malhas de controle baseadas em feedback enviado por sensores termopares (por exemplo) e sinal de corrente modulado, com tecnologia PWM Modulação por Largura de Pulso (do inglês *Pulse Width Modulation*).

A Figura 2 mostra um exemplo de máquina que utiliza a resistência elétrica de maneira controlada para obter o recozimento de peças metálicas.

Figura 2 - Mufla para recozimento de produtos metálicos

Descrição da Imagem: esta figura representa uma mufla industrial com a porta aberta. Este equipamento é utilizado para aquecer peças metálicas e produzir o recozimento delas.

Dimensionar o elemento resistivo de uma máquina elétrica exige análise dinâmica, ou seja, interpretar se a resistência será alimentada com uma corrente de intensidade contínua ou variável, pois há aplicações nas quais a precisão no controle térmico seja necessária, como, por exemplo, na montagem de placas de circuito impresso, na qual os componentes são pequenos e sensíveis e o controle de temperatura deve ser eficiente a ponto de não danificar os circuitos internos.

Figura 3 - Máquina utilizada na montagem de placas de circuito impresso: soldagem delicada e temperatura controlada

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma placa de circuito impresso sendo montada por uma máquina automática, na qual a temperatura de soldagem deve ser controlada para que os componentes não sofram danos em seus circuitos internos. No centro da imagem, uma garra robótica segura um circuito integrado de montagem em superfície (SMD) e o direciona para sua posição na placa onde será soldado e fixo permanentemente.

Aqui iremos adotar a resistência R que compõe a queda de tensão v_R, parâmetro de um circuito que pode variar no tempo, conforme a variação de corrente como sendo $v_R(t)$, assim:

$$v_R(t) = R.i(t)$$

Equação 1
Desta forma:

$$i(t) = \frac{1}{R}.v_R(t)$$

Equação 2
ou
$$i(t) = G.v_R(t)$$
Equação 3
Em que:
$i(t)$: corrente elétrica no tempo "t" (Ampère).

G: condutância elétrica (Siemens).
$v_R(t)$: Queda de tensão sobre o resistor no tempo "t" (Volt).
R: Resistência do resistor - considerada constante na maioria dos casos (Ohms).

A Figura 4 mostra a representação do resistor R e da queda de tensão $v_R(t)$.

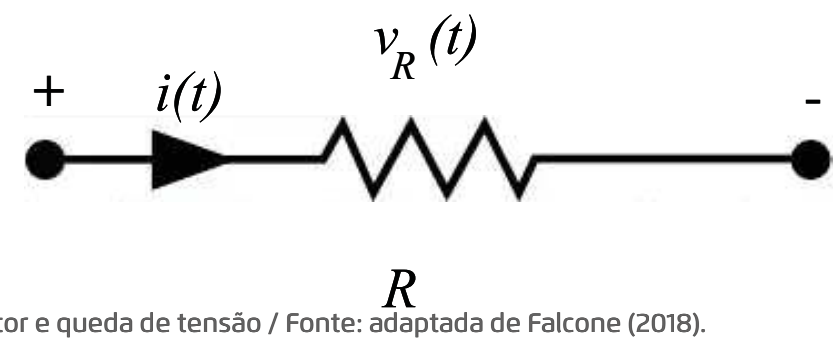


Figura 4 - Resistor e queda de tensão / Fonte: adaptada de Falcone (2018).

Descrição da Imagem: esta imagem apresenta o símbolo esquemático de um resistor R com a representação da corrente elétrica i(t) circulando por sua estrutura e consequente queda de tensão representada por VR(t) e devida polarização positivo (+) e negativo (-).

Para o caso em que a resistência elétrica de um resistor apresente variação de seu valor ôhmico no tempo, por conta de influências externas, por exemplo, a influência da temperatura, luz, tensão, a variável tempo deve ser considerada na notação de resistência, sendo representada por $R(t)$.

Como temos dissipação de calor no processo envolvido pela presença de $v_R(t)$ (que é resultado da corrente circulante pelo elemento resistivo), temos como resultado a potência $P_R(t)$, dado na Equação 4:

$$P_R(t) = R.[i(t)]^2$$

Equação 4

Que também pode ser definida como:

$$P_R(t) = G.[v_R(t)]^2$$

Equação 5

Nos elementos magnéticos utilizados na construção das máquinas, é comum o uso de enrolamentos de cobre formando bobinas que apresentam uma propriedade muito especial, a **indutância** "L", medida em Henry.

Figura 5 - Indutor em núcleo toroidal de ferrite

Descrição da Imagem: esta figura mostra um indutor montado em um núcleo de ferrite com formato toroidal.

Quando um enrolamento é associado a uma fonte de tensão em um circuito fechado, temos o surgimento de uma queda de tensão v_L que pode ser definida por:

$$v_L = \frac{d(L.i)}{dt}$$

Equação 6
em que:

$$v_L = L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}$$

Equação 7

A indutância será considerada constante e com isso podemos ainda definir a v_L como sendo:

$$v_L = L\frac{di(t)}{dt} = L\frac{d^2q(t)}{dt^2}$$

Equação 8

A Figura 6 mostra a representação do indutor L e da queda de tensão $v_L(t)$.

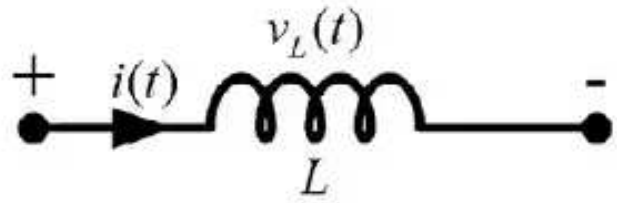


Figura 6 - Indutor e a queda de tensão / Fonte: adaptada de Falcone (2018).

Descrição da Imagem: esta imagem apresenta o símbolo esquemático de um indutor L com a representação da corrente elétrica i(t) circulando por sua estrutura e consequente queda de tensão representada por VL(t) e devida polarização positivo (+) e negativo (-).

Sendo $q(t)$ medido em Coulomb, representa a quantidade de carga elétrica que percorre um condutor no tempo, no caso, do indutor, para o valor de indutância constante, e consequentemente a corrente, e é dado por:

$$q(t) = \int idt$$

Equação 9

Contudo, em vários casos práticos, como eletroímãs, a indutância sofre variação no domínio do tempo. Deste modo, a corrente fica:

$$i(t) = \frac{1}{L}\int_{0-}^{t} v_L(t)dt + (0_)$$

Equação 10

Em que $i(0_)$ é a corrente residual existente no indutor, tendendo a zero pela esquerda (FALCONE, 2018).

Os transformadores são dispositivos formados por indutores associados de modo a compor enrolamentos, assim como já iniciamos o estudo na Unidade 1 deste livro, temos sua representação dada na Figura 7:

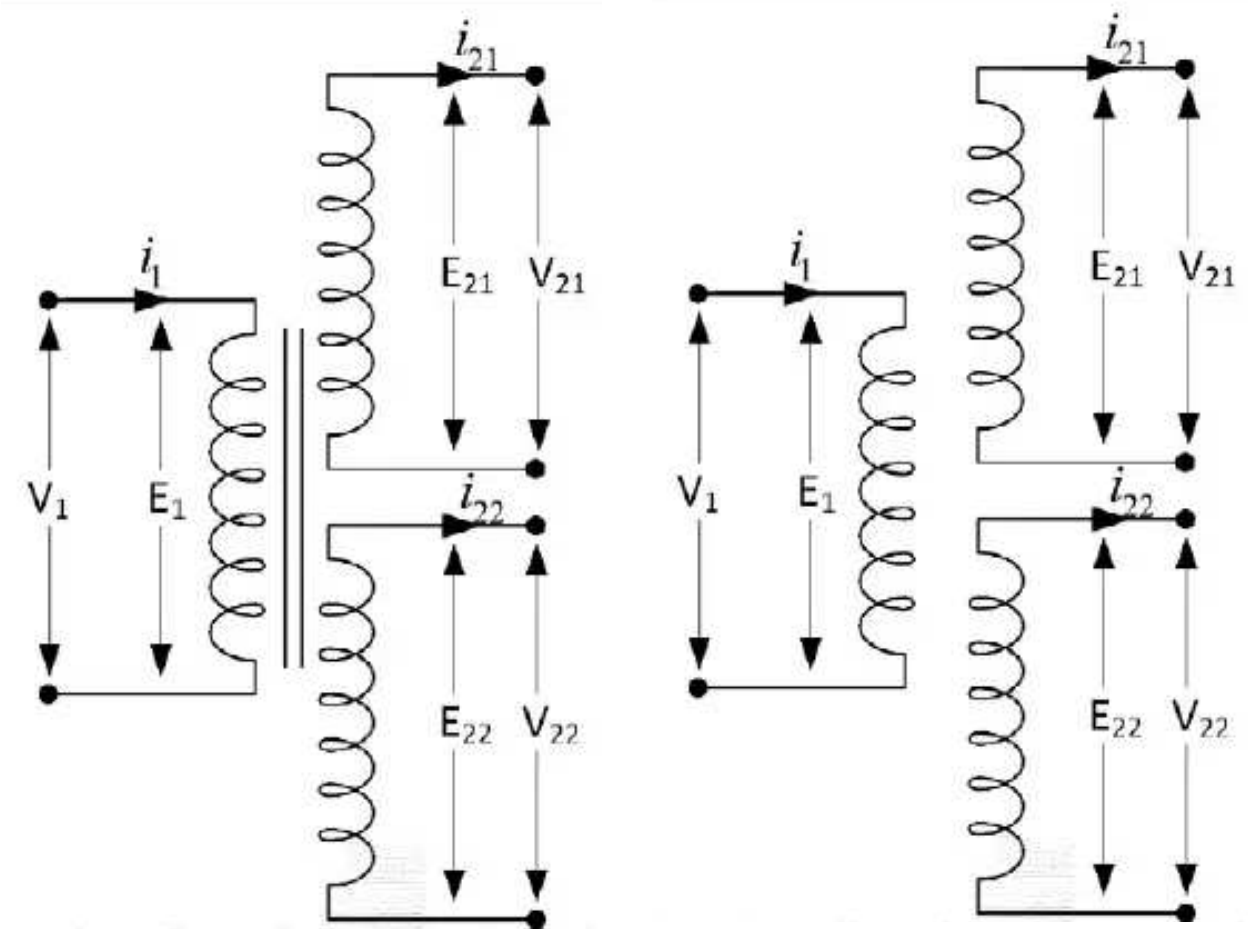


Figura 7 - Símbolo do transformador com dois enrolamentos secundários: (a) núcleo ferromagnético (chapas de aço-silício) e (b) núcleo de ar / Fonte: adaptada de Falcone (2018).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta dois símbolos para o transformador, sendo que a figura da esquerda é um símbolo para o transformador com núcleo ferromagnético com chapas de aço-silício e a figura da direita é o símbolo para transformador de dois secundários com núcleo de ar.

O símbolo do transformador deve mostrar os enrolamentos e suas ligações (quando houver). No caso da Figura 7, temos dois exemplos de símbolos de transformadores, onde o transformador da esquerda (a) apresenta um enrolamento primário com núcleo de aço-silício e dois enrolamentos secundários independentes, não interligados, já o símbolo utilizado para representar o transformador da direita (b) possui os mesmos números de enrolamentos que o transformador em (a), porém, com núcleo de ar.

Ao considerar que a integral da força eletromotriz (f.e.m.) corresponde ao fluxo concatenado, dado pela relação:

$$\lambda = N\varphi$$

Equação 11

temos então que a f.e.m. é dada por $v_{L(t)}$, daí fica:

$$i(t) = \frac{\lambda(t)}{L} + i(0_)$$

Equação 12

Isso permite afirmar que a energia armazenada (E_{mag}) é:

$$E_{mag} = \frac{1}{2}(L.i^2)$$

Equação 13

Já o cálculo da potência (P_L) é dada por:

$$P_L = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} + L.i\frac{di}{dt}$$

Equação 14

E considerando-se L constante, fica:

$$P_L(t) = v_L(t).i_L(t) = L.i(t)\frac{di}{dt}$$

Equação 15

Quando há o acoplamento magnético entre circuitos, temos então que:

$$v_1 = \frac{d(Mi_2)}{dt}$$

Equação 16

e

$$v_2 = \frac{d(Mi_1)}{dt}$$

Equação 17

O que nos permite afirmar que a energia armazenada neste processo depende da relação (FALCONE, 2018):

$$\frac{1}{2} L_1 . i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 . i_2^2 + M i_1 i_2$$

Equação 18

As máquinas elétricas com partes móveis normalmente utilizam motores elétricos para acionar seus eixos, os quais podem ser síncronos ou assíncronos, de acordo com a necessidade do projeto. No entanto, independente da topologia de cada um, há um ponto em comum entre eles: a existência de bobinas que conhecemos como indutores.

Figura 8 - Indutores (bobinas) do estator de um motor elétrico - controle de velocidade com manipulação da corrente de magnetização

Descrição da Imagem: esta figura mostra um estator de motor de indução aberto sem rotor para observação das bobinas enroladas em suas ranhuras. As bobinas estão isoladas e amarradas ao estator por meio de linhas especiais poliméricas.

Como o controle de velocidade é uma necessidade em muitos motores, é importante salientar que, mesmo em baixas velocidades, é necessário manter o torque constante para que as tarefas da máquina sejam realizadas conforme seu propósito. Por este motivo, mais uma vez é necessário manipular a corrente elétrica que alimenta os indutores da máquina. Normalmente, a técnica de controle utiliza o PWM e malha de controle realimentada por meio de encoder incremental ou absoluto para inferência sobre a posição angular do eixo da máquina (KOSOW, 2005).

Também precisamos conhecer os fundamentos de um elemento fundamental relacionado às máquinas elétricas, que é a **capacitância**. Esta propriedade confere ao capacitor a funcionalidade de armazenar cargas "q" variante no tempo, em suas placas, o que resulta na tensão "$v_c(t)$" em seus terminais dada por:

$$v_c(t) = \frac{1}{C}.q(t)$$

Equação 19

Substituindo-se a Equação 9 na Equação 19, fica:

$$v_c(t) = \frac{1}{C}.\int i(t)dt + v_c(0_)$$

Equação 20

Em que $v_c(0_)$ é a tensão residual inicial dada em função da carga inicial $q(0_)$:

$$v_c(0_) = \frac{1}{C}.q(0_)$$

Equação 21

Assim, a corrente i fica:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(C.v_c)}{dt}$$

Equação 22

Em casos em que a capacitância varia no tempo, como é o caso dos microfones ou sensores capacitivos, a representação matemática para a corrente fica:

$$i(t) = C\frac{dv_c(t)}{dt}$$

Equação 23

Figura 9 - Sensor capacitivo industrial - a capacitância depende da distância

Descrição da Imagem: esta figura mostra um sensor capacitivo industrial montado em uma máquina na qual sua atuação se dá na detecção do estado de atuação de uma porta que, ao fechar, aproxima uma guia de metal da face de detecção do capacitor e, ao abrir, afasta a guia de modo que o sensor envia um sinal elétrico da detecção por meio de condutores metálicos ao controlador do processo.

A representação para o símbolo representativo do capacitor, a tensão e corrente sobre sua estrutura pode ser observada na Figura 10:

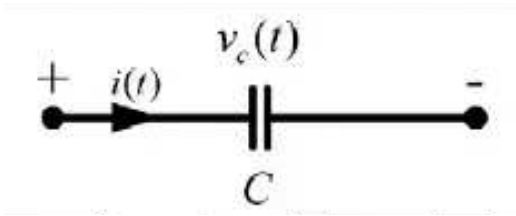


Figura 10 - Símbolo representativo do capacitor, a tensão sobre seus terminais e corrente
Fonte: adaptada de Falcone (2018).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta o símbolo de um capacitor e a representação da corrente circulando por sua estrutura, além do surgimento da tensão em seus terminais.

Já em relação à energia armazenada no capacitor, podemos representar:

$$E_c = \frac{1}{2}(Cv_c^2)$$

Equação 24

Em que a potência no capacitor depende de:

$$P_c = v_c.i = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2}v_c^2.\frac{dC}{dt} + C.v_c\frac{dv_c}{dt}$$

Equação 25

Assim, para valores constantes de C, fica:

$$P_c(t) = C.v_c(t)\frac{dv_c(t)}{dt}$$

Equação 26

O dimensionamento de capacitores é fundamental para o projeto de máquinas elétricas, pois **é** utilizado no controle de fator de potência, partida de máquinas, filtros e demais aplicações. Estudamos os efeitos dinâmicos da tensão, corrente e consequentemente a potência em situações com corrente estável ou variável para dimensionar este elemento em regime de serviço aplicado.

Figura 11 - Capacitores de correção de fator de potência

Descrição da Imagem: esta figura mostra alguns capacitores eletrolíticos normalmente dimensionados para atuar na correção do fator de potência.

O livro Máquinas Elétricas e Transformadores, de Irving L. Kosow, é um dos mais respeitados livros na área de controle de máquinas elétricas e seus elementos, consistindo em uma obra de referência para todos os estudantes da área.

O livro traz assuntos relacionados à conversão eletromecânica de energia, relação de tensão nas máquinas CC e CA, estudo do torque em máquinas de corrente contínua e corrente alternada (motores síncronos), além de parâmetros relacionados às tensões de armadura e comutação em máquinas elétricas, motores elétricos e um capítulo apenas sobre os transformadores.

Como já temos uma noção da interação entre elementos resistivos, indutivos e capacitivos, e suas respectivas tensões, correntes e consequentemente a potência com valores constantes e ou variáveis, iremos agora realizar uma análise conjunta de cada elemento associado. Vamos interpretar o circuito da Figura 12:

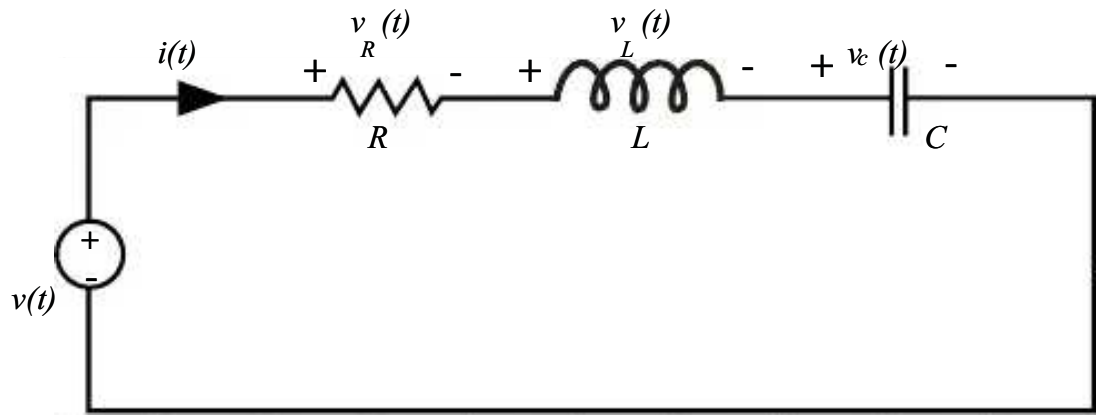


Figura 12 - Circuito RLC série e suas componentes / Fonte: adaptada de Falcone (2018).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um circuito RLC série com fonte de tensão, corrente representada na malha, tensões sobre cada elemento e suas identificações.

Matematicamente, aplicando a lei das tensões de Kirchhoff, podemos afirmar que:

$$v(t) = v_R(t) + v_L(t) + v_c(t)$$

Equação 27

Daí, conforme cada componente de tensão dado, fica:

$$v(t) = R.i(t) + L\frac{di(t)}{dt} + C\int i(t)dt$$

Equação 28

Ou pela definição de cargas elétricas, a equação da malha RLC série fica:

$$v(t) = R\frac{dq(t)}{dt} + L\frac{d^2q(t)}{dt^2} + \frac{1}{C}q(t)$$

Equação 29

A revisão destes itens é necessária para que possamos avançar nos elementos inerentes a este livro e que serão aprofundados a partir da próxima unidade, logo, iniciaremos nesta etapa de nossos estudos, as analogias entre circuitos elétricos e magnéticos que serão apresentadas na sequência.

Quando analisamos o funcionamento de máquinas elétricas, podemos encontrar associações de componentes resistivos, indutivos e capacitivos de modo a compor circuitos em série, paralelos ou configurações mistas. Um exemplo é o caso de uma máquina que alimenta um motor elétrico utilizado para acionar sua esteira alimentadora de peças, que tem capacitor de correção de fator de potência em paralelo com a bobina do estator na mesma linha de alimentação e um resistor de aquecimento para sinterizar peças metálicas.

Máquinas elétricas que utilizam resistência, indutância e capacitância são comuns em ambientes industriais e o Engenheiro deve ser capaz de interpretar cada relação entre seus elementos funcionais de modo analítico, levando em consideração sua disposição no circuito, associação, componentes de tensão, corrente, regime de operação (transitório e estacionário) e, principalmente, relações de potência associadas ao tempo de utilização em regime contínuo.

A Figura 13 mostra um exemplo de máquina elétrica que promove o aquecimento de elementos de máquinas, no caso, roletes de rolamentos, que devem passar por tratamento térmico o qual aumenta a resistência mecânica e a vida útil do componente. Este é um exemplo de máquina que possui motor elétrico (elemento indutivo), resistor de aquecimento (elemento resistivo) e capacitor de correção de fator de potência (elemento capacitivo).

Figura 13 - Tratamento térmico em elementos de rolamentos - aquecimento por resistência elétrica, transporte por esteira acionada por motor elétrico com capacitor de correção de fator de potência

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma esteira de transporte que conduz roletes de rolamentos ao interior de um forno para tratamento térmico necessário ao aumento de sua resistência mecânica.

Olá, estudante! Convido você para ouvir este podcast onde iremos falar a respeito dos circuitos utilizados em conversão eletromecânica de energia, suas particularidades, aplicações e curiosidades.

Ao estudar os componentes de um circuito aplicado em uma máquina elétrica, é possível analisar seu funcionamento em termos dimensionais e, ao estudar esta unidade, você se torna capaz de interpretar cada elemento de um circuito elétrico com base em sua interação matemática e estimar as correntes, tensões e potências, competências fundamentais para o exercício da função e também para aplicação nas unidades futuras deste livro.

Olá, estudante, vamos agora revisitar os termos que acabamos de aprender nesta unidade a partir de um mapa conceitual. Com ele, você deve relembrar de cada termo e sua definição, e então irá construir seu próprio mapa conceitual explicando sua definição e um exemplo aplicado.

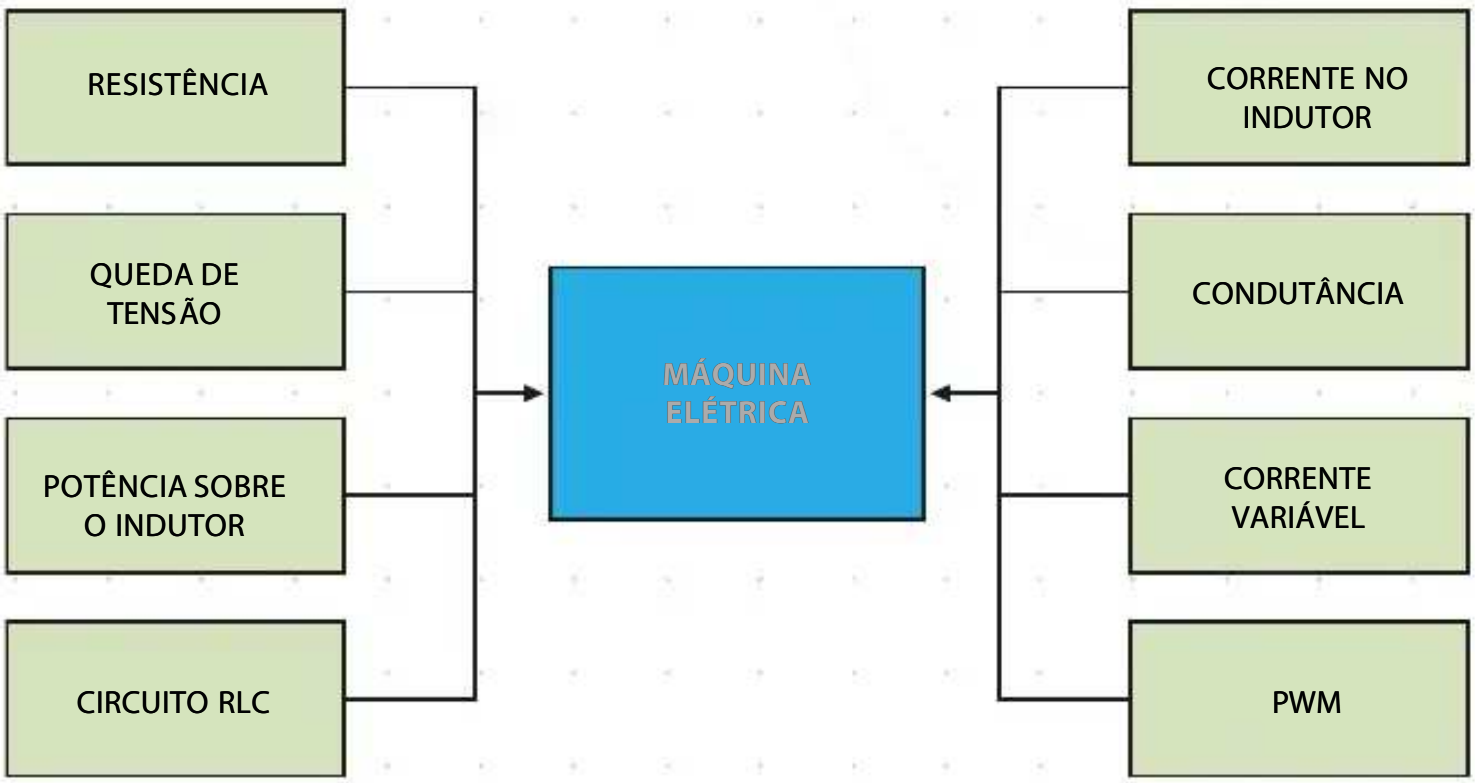


Figura 1 - Mapa conceitual da Unidade 2

Descrição da Imagem: esta figura mostra um mapa conceitual com a frase máquina elétrica no centro e demais termos interligados: resistência, queda de tensão, potência sobre o indutor, circuito RLC, corrente no indutor, condutância, corrente variável e PWM.

MAPA MENTAL

Agora que você já recordou os termos, preencha no seu mapa conceitual cada definição e uma aplicação prática de cada um.

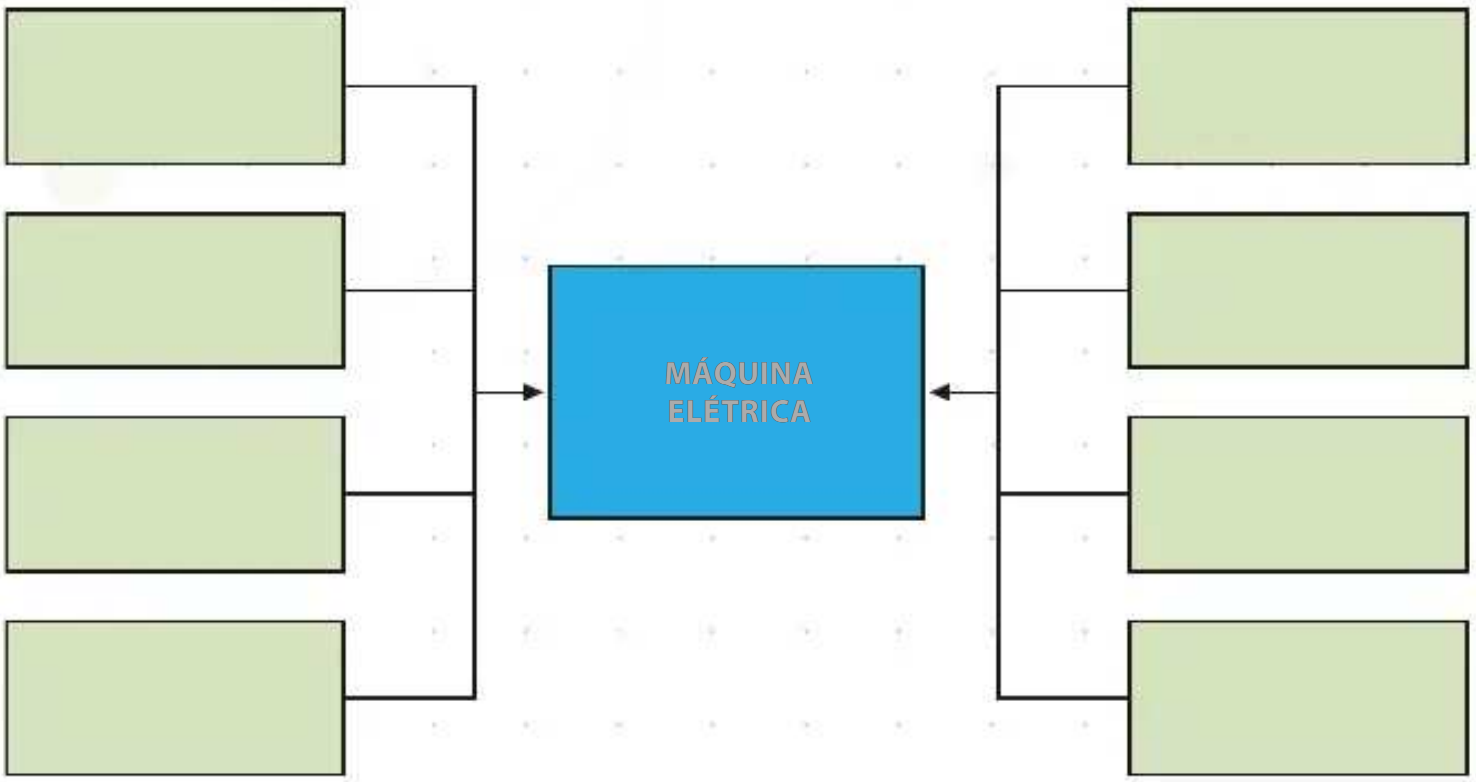
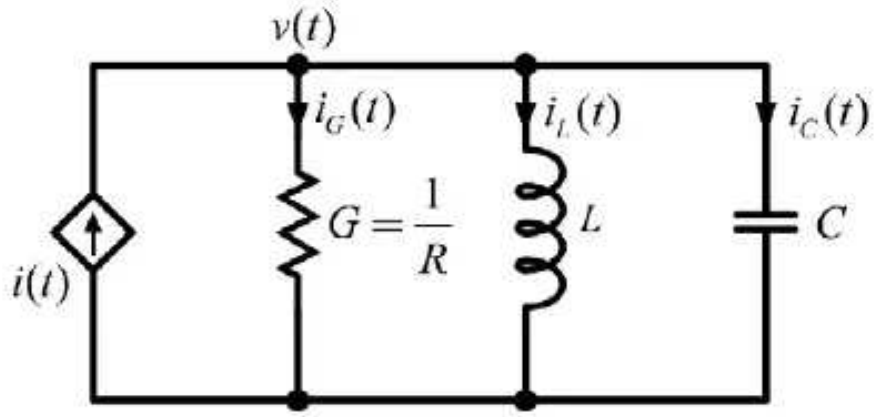


Figura 2 - Mapa conceitual do aluno

Descrição da Imagem: esta figura mostra um mapa conceitual com a frase máquina elétrica no centro e campos vazios interligados para preenchimento.

1. Em análise a uma máquina elétrica, um Engenheiro encontrou um circuito composto por uma resistência de aquecimento da câmara de entrada de peças para sinterização, capacitor para correção de fator de potência e indutor da bobina do motor da esteira. Para calcular cada componente foi preciso escrever a equação do nó baseado na informação inicial dada: $v(t) = v_L(t) = \frac{d}{dt}\lambda(t)$. Sobre a equação do nó do circuito dado é correto afirmar que:



Fonte: adaptada de Falcone (2018).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um circuito alimentado por uma fonte de corrente com resistor, indutor e capacitor em paralelo com a fonte de corrente.

a) A equação do nó é: $i(t) = G\frac{d\lambda(t)}{dt} + C\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \frac{1}{L}\lambda(t)$

b) A equação do nó é: $i(t) = C\frac{d\lambda(t)}{dt} + G\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \frac{1}{L}\lambda(t)$

c) A equação do nó é: $i(t) = L\frac{d\lambda(t)}{dt} + C\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \frac{1}{G}\lambda(t)$

d) A equação do nó é: $i(t) = G\frac{d\lambda(t)}{dt} + L\frac{d\lambda(t)}{dt} + \frac{1}{C}\lambda(t)$

e) A equação do nó é: $i(t) = G\frac{d\lambda^2(t)}{d^2t} + C\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \frac{1}{L}\lambda(t)$

AGORA É COM VOCÊ

2. **Um transformador é uma máquina elétrica estática, pois não possui partes móveis. Ao utilizar um transformador de 75 kW enquanto sua carga acoplada consome apenas 50 kW, qual o efeito que este superdimensionamento pode trazer para a empresa que o utiliza? Assinale a alternativa correta:**

   a) Não há qualquer influência para a empresa, pois significa que haverá sobra de energia disponível e, portanto, vantagens para a indústria.

   b) Sempre devemos superdimensionar os transformadores, pois somente assim é possível aumentar o fator de potência.

   c) O superdimensionamento de um elemento indutivo pode significar problemas com energia reativa em excesso, o que pode resultar em multas na tarifa de energia.

   d) O problema de superdimensionar transformadores é que será necessário utilizar resistores em paralelo com cada bobina para atrasar a tensão e minimizar a potência reativa.

   e) Ao superdimensionar o transformador, tornamos a rede elétrica mais leve e com isso capaz de realizar trabalho regenerativo.

3. **As máquinas elétricas que atuam na indústria possuem indutores que podem suportar regimes de trabalho rigorosos e variações de temperatura. Assinale a alternativa correta no que diz respeito à variação de temperatura.**

   a) A variação de temperatura não pode surtir efeito sobre as variáveis funcionais de uma máquina, uma vez que a corrente se mantém sempre constante em elementos indutivos.

   b) A variação de temperatura consiste em uma influência externa que pode alterar o comportamento de componentes e com isso a corrente elétrica que circula pelo seu corpo.

   c) A resistência de aquecimento não permite variações de corrente em função da temperatura, já que o elemento resistivo é isento de influências externas.

   d) O capacitor eletrolítico é imune às variações de temperatura e, portanto, não altera a sua capacitância caso haja alterações térmicas.

   e) Circuitos RLC paralelo não são suscetíveis a variações de temperatura, pois as componentes resistiva, indutiva e capacitiva anulam essa influência externa.

AGORA É COM VOCÊ

MEU ESPAÇO

3 Circuitos Magnéticos – Princípios

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Oportunidades de aprendizagem: Nesta unidade, você terá a oportunidade de aprender sobre os princípios dos circuitos magnéticos, as variáveis e definições fundamentais, além de explorar os equacionamentos e relações envolvidas nos circuitos magnéticos com o objetivo de interpretar o comportamento de cada interação a fim de te preparar para a próxima unidade, na qual iremos aplicar esses conceitos nos circuitos magnéticos.

Você já deve ter observado uma fechadura elétrica que é normalmente utilizada nas portas de entrada de edifícios e residências ou mesmo aqueles eletroímãs enormes que têm a capacidade de transportar até mesmo o peso de um veículo em um ferro-velho de demolição. Além desses exemplos, existem máquinas capazes de emitir campo magnético suficiente para penetrar no tecido do corpo humano e permitir seu estudo e diagnóstico de doenças com recursos de imagem por meio da ressonância magnética.

Os motores elétricos produzem movimento em seus eixos por meio de indução eletromagnética e, assim, a energia elétrica é convertida em energia mecânica, graças à corrente que circula pelos condutores de suas bobinas.

São inúmeras as aplicações onde os circuitos magnéticos são aplicados, desde a indústria até nossas casas, mas como é possível que o movimento de um eixo em uma máquina ocorra sem contato mecânico entre as partes? Você sabe como o fluxo magnético atua para que o eixo de uma máquina entre em operação e quais as variáveis que interferem neste processo?

Atualmente, assistimos a inovações (quase que diárias) no modo com que as máquinas são desenvolvidas, empregando recursos tecnológicos que controlam e otimizam o uso de energia, que tornam mais eficientes os processos de conversão entre variáveis e até mesmo apresentam tecnologias inéditas para auxiliar nas tarefas diárias das pessoas.

Podemos afirmar que:

Os transformadores utilizam fluxo magnético para induzir diferença de potencial elétrico em seus enrolamentos e, assim, conseguimos controlar o valor da tensão que entregamos a uma carga.

Os motores elétricos acionam seus eixos graças ao fluxo magnético induzido entre estator e rotor, que é consequência de uma corrente circulando em seus condutores e bobinas.

Um eletroímã atrai metais por conta do campo magnético produzido em sua face de contato, da mesma forma com que uma fechadura elétrica pode manter a porta fechada quando é acionada por corrente elétrica.

Um veículo elétrico pode acelerar e vencer obstáculos antes só possíveis com o uso de motores de combustão interna e, atualmente, motores elétricos em veículos são utilizados em motos, carros, ônibus e até mesmo em caminhões.

Muitos dispositivos que fazem parte de nosso tempo dependem da relação entre variáveis elétricas e magnéticas; por este motivo, estudar os circuitos magnéticos se torna fundamental para entendermos como

funcionam os elementos magnéticos que utilizamos todos os dias em nossas residências e no trabalho.

Olá, estudante, chegou a hora de fazer um experimento para testar seu conhecimento deste tema até o seguinte momento. Para isso, iremos realizar uma dinâmica que requer sua atenção.

Para esta atividade, você irá precisar de um ímã pequeno, uma mesa com tampo de madeira ou vidro e 5 moedas.

Insira o ímã debaixo do tampo da mesa e uma moeda alinhada com a posição do ímã sobre o tampo. Agora comece a movimentar o ímã. Você deverá observar que a moeda realiza o mesmo movimento que o ímã e que se afastarmos lentamente o ímã (em movimento) da superfície inferior do tampo, em certa distância a moeda não mais se movimentará, aproximando-se o ímã novamente do tampo, a moeda então retorna ao movimento seguindo o ímã.

Quando você insere outra moeda sobre a primeira moeda formando uma pilha, perceba que há uma certa dificuldade de as moedas reproduzirem os movimentos do ímã, e isso se agrava na medida em que inserimos mais e mais moedas até atingir tal condição que o ímã não é mais capaz de movimentar a pilha formada.

Figura 1 - Pilhas de moedas e ímã

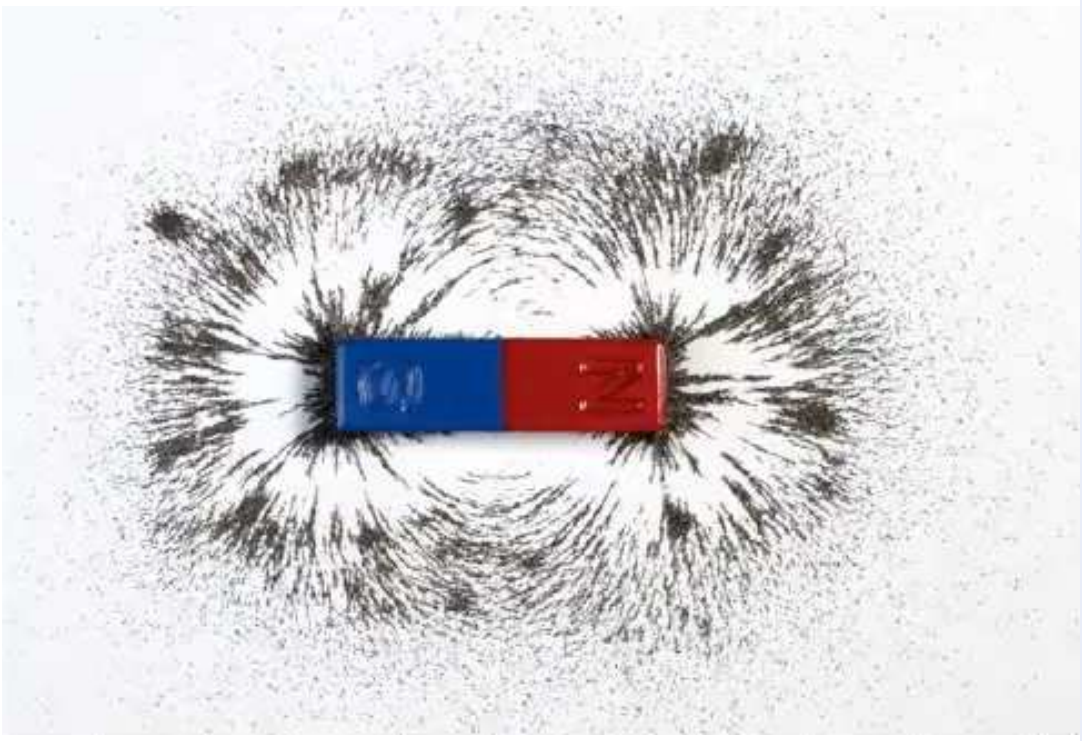
Descrição da Imagem: esta figura mostra quatro pilhas de moedas contendo 2, 4, 9 e 15 moedas, respectivamente em cada pilha da esquerda para a direita, e a mão de uma pessoa segurando um ímã que se aproxima da pilha da direita, que é a maior.

Quando convertemos a corrente elétrica em um campo magnético, assistimos a um fenômeno muito interessante que produz como resultado a capacidade de realizar esforço mecânico, o surgimento de campo magnético. Esta propriedade reversível é possível de se observar quando temos em mãos um ímã que, ao aproximarmos metais dos seus polos, observamos a capacidade de atraí-los até um certo limite. Por quê? O que explica essa força que é capaz de mover objetos?

Qual a relação entre a força do campo magnético com as variáveis tensão e corrente, por exemplo, quando o fluxo magnético depende da corrente elétrica em um condutor metálico para ser produzida?

Quando o ímã foi utilizado para atrair as moedas na mesa, houve um momento em que não mais conseguiu movimentar a pilha de moedas; sendo que há uma relação entre a massa do corpo formado pela pilha de moedas e o campo magnético, essa relação é direta ou inversamente proporcional?

DIÁRIO DE BORDO



O campo magnético é sem dúvidas um dos fenômenos naturais mais fascinantes de todos, pois possibilita tangibilidade e interação únicas em diversas áreas. Aqui, em nosso estudo, iremos relacionar cada variável associada ao campo magnético às variáveis elétricas, como correspondentes.

Vamos resgatar alguns conceitos importantes que estudamos em Física e que aqui farão todo o sentido para o entendimento das máquinas elétricas e dos processos de conversão eletromecânica de energia, uma vez que o estudo dos circuitos magnéticos ocorre em comparação com os circuitos elétricos e todas as suas definições decorrem da Física.

Perceba você, estudante, que o campo elétrico tem origem e fim definidos entre cargas elétricas, enquanto o campo magnético não tem início e nem fim, pelo fato de cada linha de campo ser fechada (BIM, 2012).

Podemos associar as propriedades do **vetor densidade de fluxo** $\overline{B}$, com o vetor **densidade de corrente de condução**, que definimos como "J", conforme a Equação 1 e a Equação 2:

$$\oint \overline{J}.\overline{ds} = 0$$

Equação 1

$$\oint \overline{B}.\overline{ds} = 0$$

Equação 2

Cada linha de corrente em uma superfície é fechada, assim como a corrente circula em caminhos fechados; é a mesma situação que ocorre com as linhas fechadas de fluxo magnético "Φ", conforme podemos observar por meio das equações a seguir (BIM, 2012):

$$i = \int_S \overline{J}.\overline{ds}$$

Equação 3

$$\Phi = \int_S \overline{B}.\overline{ds}$$

Equação 4

Contudo, essa relação só é válida para um circuito em corrente contínua em que o fluxo magnético for considerado desprezível fora do ramo do circuito. No entanto, na maior parte dos casos, não podemos desprezar qualquer fluxo magnético fora do ramo dos circuitos, enquanto que no caso de circuitos elétricos a corrente de fuga (fora dos condutores) normalmente é desprezada.

Antes das descobertas realizadas em 1831 por Michael Faraday (22 de setembro de 1791 - 25 de agosto de 1867), a diferença de potencial era gerada por meio da reação química, semelhante à que ocorre em uma pilha, desenvolvida em 1799 por Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (18 de fevereiro de 1745 – 5 de março de 1827).

Olá, estudante, convido você a conhecer um pouco da história das pesquisas realizadas sobre eletromagnetismo e seus pensadores que foram responsáveis pelo desenvolvimento dos itens fundamentais ao desenvolvimento que temos atualmente.

(a)

(b)

Figura 2 - Pioneiros da eletricidade e do eletromagnetismo: (a) Michael Faraday e (b) Alessandro Volta

Descrição da Imagem: nesta figura há dois desenhos em grafite representando os cientistas Michael Faraday (à esquerda) e Alessandro Volta (à direita).

Após as contribuições de Faraday, os rumos da tecnologia mudaram. Praticamente a maioria dos dispositivos elétricos que temos em casa e na indústria dependem dos resultados obtidos inicialmente em suas pesquisas.

Um pouco de história: em 1831, um físico e químico britânico chamado Michael Faraday descobriu o primeiro intercâmbio entre a energia elétrica e mecânica, possibilitando a origem de dispositivos como o motor elétrico, o transformador, o microfone, o alto falante, o galvanômetro, entre outros. Faraday descobriu que poderia ser realizada a geração de energia elétrica por meio do movimento relativo entre um campo magnético e um condutor metálico de eletricidade.
Fonte: adaptado de Kosow (2005).

Quando uma corrente "i" percorre um condutor metálico, temos como consequência o surgimento de um fluxo magnético "Φ". A corrente multiplicada pelo número de espiras do enrolamento determina a **diferença de potencial magnético** entre dois pontos, o que é semelhante à **tensão** elétrica entre dois pontos, conforme podemos representar matematicamente como sendo a integral de linha do **campo elétrico** "E", assim, a equivalência entre a Equação 5 e a Equação 6:

$$v_{BA} = -\int_A^B \overline{E}.d\bar{l}$$

Equação 5

$$\mathcal{F}_{BA} = -\int_A^B \overline{H}.d\bar{l}$$

Equação 6

Na Equação 6, a variável $\overline{H}$ representa a **intensidade de campo magnético**, medida em A/m e a diferença de potencial magnético ou "**força magnetomotriz**" é representada pela variável $\mathcal{F}$.

"A soma algébrica dos fluxos magnéticos em um nó é nula."
Fonte: Bim (2012, p. 2).

"O valor da tensão induzida em uma espira de fio condutor é proporcional à razão de variação das linhas de força que passam através daquela espira."
Fonte: Kosow (2005, p. 4).

Assim como em um circuito elétrico temos a resistência ôhmica, que representa a oposição à circulação de corrente elétrica, também temos uma variável do eletromagnetismo denominada **relutância magnética** "$\mathcal{R}$", a qual limita a propagação de fluxo magnético em meio. Podemos estabelecer as equivalências entre as equações conforme mostrado na Equação 7 e na Equação 8:

$$R = \frac{v}{i}$$

Equação 7

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi}$$

Equação 8

Na Equação 8, temos a relutância magnética "$\mathcal{R}$" que é diretamente proporcional à força magnetomotriz "$\mathcal{F}$" e inversamente proporcional ao fluxo magnético "Φ". Observe que a Equação 7 (oriunda da 1º lei de Ohm) apresenta as variáveis equivalentes às mostradas na Equação 8; assim, da mesma maneira que um ímã possui fluxo magnético permanente, temos uma fonte de corrente em circuitos elétricos, como, por exemplo, em um painel solar fotovoltaico enquanto submetido à luz do sol.

Figura 3 - Painéis fotovoltaicos: exemplo de fonte de corrente quando conectado à carga e diante da luz solar

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma instalação de painéis fotovoltaicos localizados no campo com a incidência de luz solar.

Diferentemente dos circuitos elétricos, que temos a corrente elétrica controlada dentro de limites isolados dos seus condutores, nos circuitos magnéticos não há isoladores de fluxo e, portanto, temos "fugas" de fluxo magnético pela periferia do circuito de forma dispersa. Este fato atribui parcela de incerteza nos cálculos magnéticos que apresentam maior expressão do que nos cálculos de corrente elétrica.

Quando estudamos o fluxo magnético que se dispersa por uma superfície plana, consideramos sua **densidade de fluxo magnético** "B". O fluxo "Φ", medido em Weber, onde Wb é a sigla que o resulta do matemático deve utilizar, exemplo: $\Phi = 100\ Wb$, é representado como sendo:

$$\Phi = \int_S \overline{B}.ds$$

Equação 9

Sendo que $\bar{ds}$ é o elemento diferencial de superfície que multiplica o vetor unitário que atua perpendicularmente sobre esta superfície, assim, se a distribuição de fluxo magnético for uniforme, sua densidade de fluxo será da mesma maneira, dado que o fluxo magnético que atravessa a superfície S_1, dado na Figura 4, é:

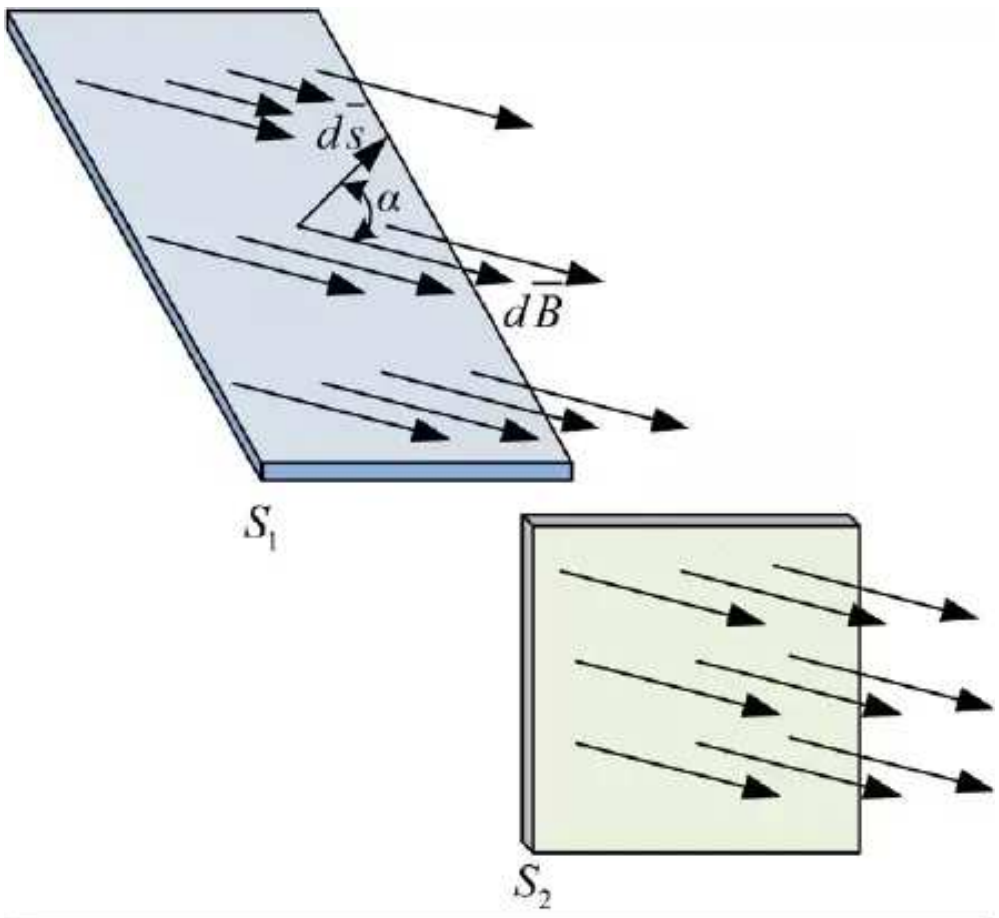


Figura 4 - Fluxo magnético fluindo por uma superfície plana
Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta figura mostra duas superfícies planas, uma retangular e outra quadrada, respectivamente identificadas por "S1" e "S2", que estão distanciadas uma à frente da outra, em que a primeira está mais inclinada para trás e a segunda com posição ereta e com as faces frontais voltadas para frente. Em ambas as superfícies, há fluxo magnético que atravessa suas espessuras, o que permite observar que há certa densidade de fluxo, no qual há um ângulo α (alfa) entre a linha de fluxo magnético $\bar{dB}$ e o vetor unitário $\bar{ds}$.

A **densidade de fluxo** magnético "B" representa a concentração de fluxo magnético que atravessa uma superfície, sendo medido em Tesla (T) ou Wb/m^2.

Desta forma, podemos afirmar que o fluxo magnético "Φ_1" que atravessa a superfície S_1 é dado por:

$$\Phi_1 = BS_1 \cos\alpha$$

Equação 10

Já no caso em que as linhas de fluxo magnético são perpendiculares ao plano da superfície, temos que $\alpha = 0$. Neste caso, o fluxo que atravessa a superfície é dado por:

$$\Phi_2 = BS_2$$

Equação 11

Em que Φ_2 é o fluxo magnético que corta a superfície S_2 da Figura 4.

Consideremos um ponto no espaço e fixemos o vetor densidade de fluxo $\overline{B}$. A distância entre este ponto e o condutor por onde a corrente geradora de fluxo está circulando é dada por:

$$\bar{r} = \hat{k}r$$

Equação 12

Assim, temos que (BIM, 2012):

$$d\overline{B} = \mu_0 \frac{id\bar{l} \times \hat{k}}{4\pi r^2}$$

Equação 13

Em que $id\bar{l}$ é a componente de corrente que circula pelo condutor metálico, $\hat{k}$ é o vetor unitário dirigido do elemento de comprimento $d\bar{l}$ orientado ao ponto de determinação de $\overline{B}$ e α_0 a permeabilidade magnética no vácuo, com valor igual à:

$$\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ Wb/m.A$$

Para determinar a densidade de fluxo magnético "B" resultante da circulação de corrente i pelo condutor metálico, temos que:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi R} i$$

Equação 14

Considerando-se $2\pi R$ como sendo o comprimento de linha de campo definida pelo raio R.

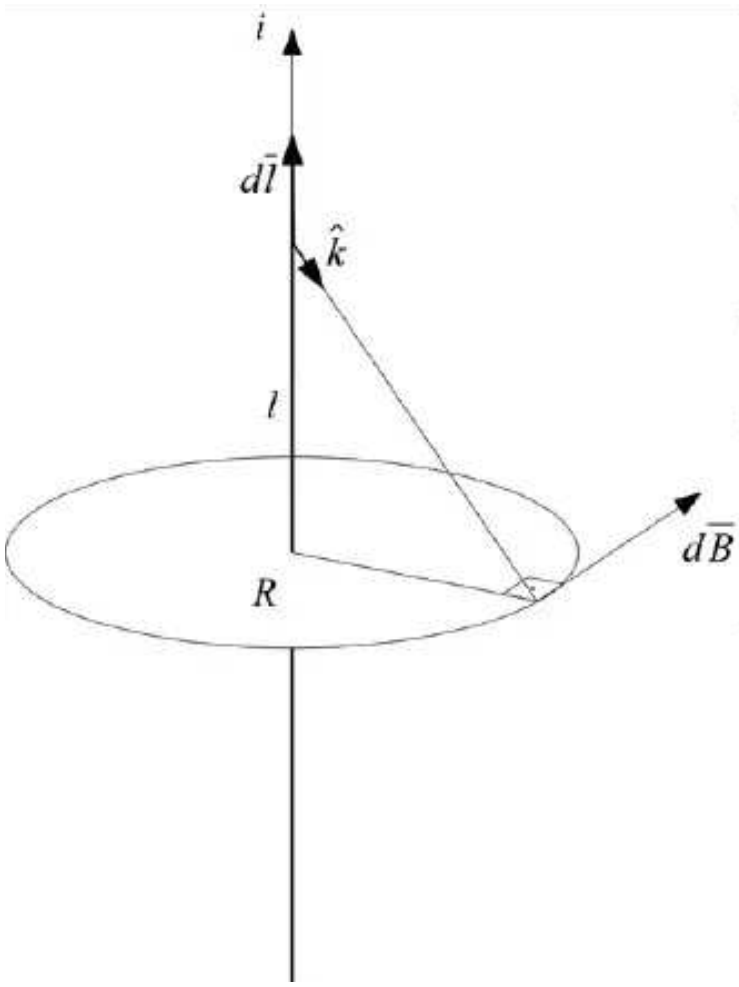


Figura 5 - Densidade de fluxo magnético em um condutor percorrido por corrente elétrica
Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma representação de corrente i em que há a formação da densidade de fluxo $\overline{B}$ alinhado como uma reta tangente à linha de campo de raio R. Também está descrito $\hat{k}$, que é o vetor unitário dirigido do elemento de comprimento $d\bar{l}$, colinear à direção de i.

Utilizando o mesmo raciocínio, podemos obter o *vetor da* ***intensidade de campo magnético*** "H" da seguinte forma (BIM, 2012):

$$d\overline{H} = \frac{id\bar{l} \times \hat{k}}{4\pi r^2}$$

Equação 15

Dado que a ***lei circuital de Ampère*** determina a partir de uma integral de linha que:

$$\oint_C \overline{H}.d\bar{l} = \sum i$$

Equação 16

Figura 6 - Andre-Marie Ampère (20 de janeiro de 1775 - 10 de junho de 1836) - físico, filósofo, cientista e matemático francês

Descrição da Imagem: nesta figura, há um desenho em grafite representando o cientista André-Marie Ampère.

Ampère foi um importante físico, filósofo, cientista e matemático francês que viveu entre 1775 e 1836. Ele desenvolveu muitos trabalhos na área de eletricidade e eletromagnetismo. O pesquisador possui seu sobrenome dado à unidade de medida de corrente elétrica, o Ampère simbolizado por “A”.

Na Equação 16, $d\bar{l}$ é associado ao comprimento da trajetória, enquanto que $\sum i$ **é a soma** algébrica das correntes concatenadas pela trajetória escolhida (BIM, 2012).

Podemos observar a partir da Figura 7 que o campo magnético produzido em torno de um condutor se distribui por meio de linhas fechadas de formação concêntrica, em que o sentido de cada linha pode ser determinado pela regra da mão direita, em que o dedão deve estar alinhado com o condutor, indicando o sentido da corrente elétrica, enquanto que os demais dedos, ao enlaçar o condutor, indicam o sentido das linhas de campo magnético.

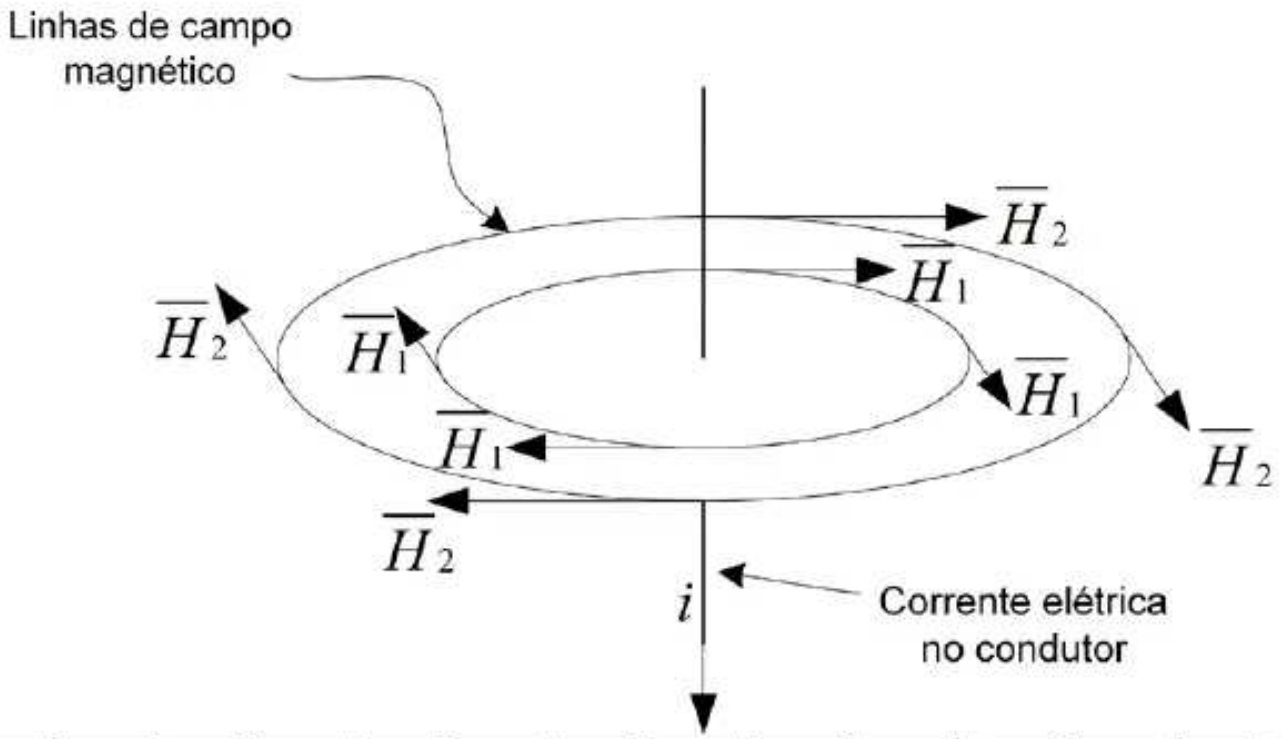


Figura 7 - Linhas de campo magnético formadas em torno de um condutor percorrido por corrente elétrica
Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta imagem mostra um condutor percorrido por corrente elétrica e linhas de indução sendo formadas com sentido orientado pela regra da mão direita.

"A lei circuital de Ampère define que a integral de linha de $\overline{H}$ em torno de uma trajetória fechada é igual à corrente total enlaçada por essa trajetória."
Fonte: Bim (2012, p. 4).

A regra da mão direita impõe uma poderosa ferramenta que pode ser utilizada para determinar o sentido das linhas de campo magnético e favorece o entendimento de sua natureza, dado como ilustrado pela Figura 8 que descreve graficamente o seu conceito.

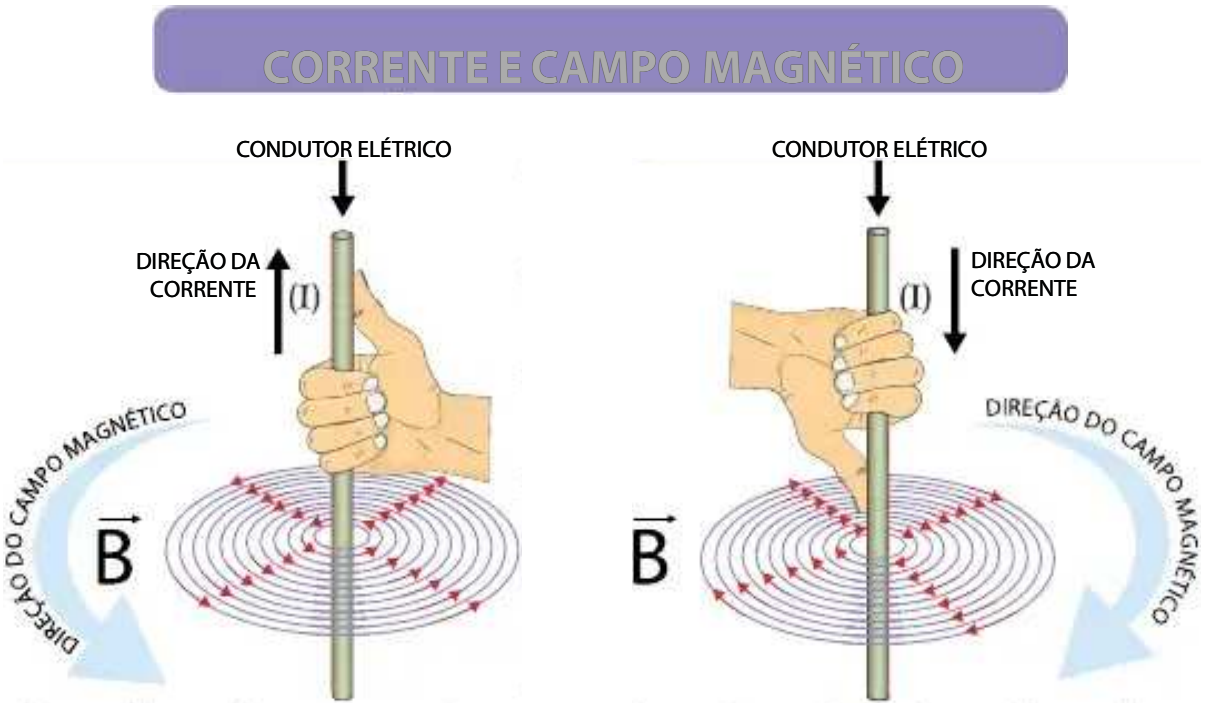


Figura 8 - Regra da mão direita - dedão indica o sentido da corrente e os demais dedos, o sentido do campo magnético

Descrição da Imagem: esta figura mostra a regra da mão direita em dois casos, sendo um onde um condutor posicionado verticalmente conduz corrente de baixo para cima e a mão direita enlaça o condutor indicando o sentido da corrente com o dedão e o sentido do campo magnético é indicado pelos demais dedos. O outro condutor é idêntico ao anterior, porém com a corrente descendente.

Quando aplicamos a lei de Ampère para calcular o campo magnético em um ponto (com trajetória escolhida) posicionado a uma distância n do condutor produtor de fluxo, temos que:

$$H_1 2\pi r_1 = i$$

Equação 17

Assim:

$$H_1 = \frac{i}{2\pi r_1}$$

Equação 18

Vamos agora estudar o conceito de força magnética existente sobre um condutor de comprimento l enquanto percorrido por uma corrente elétrica, sendo que este condutor está imerso em fluxo magnético. Esta força mecânica "f" (de origem magnética) é diretamente proporcional ao comprimento do condutor, ao fluxo magnético e à corrente circulante, sendo assim definido por:

$$f = ilB$$

Equação 19

É muito importante que você entenda essa relação de força mecânica que inicia uma primeira análise a respeito da capacidade de realização de esforço mecânico por parte de um campo magnético, o que verificamos em aplicações práticas em eletroímãs, solenoides, motores elétricos e tantas outras situações em que se deseja realizar determinada tarefa mecânica utilizando o magnetismo.

O Maglev é um tipo de comboio de levitação magnética que se assemelha aos tradicionais trens de transporte de passageiros, porém, enquanto em estado de movimento, não possui contato com os trilhos, conferindo a capacidade de deslocar-se sem atrito e, com isso, sem ruídos graças à força magnética e o uso de supercondutores. Este conceito permite viagens mais rápidas e econômicas, já que a eficiência do equipamento é elevada. Será possível que nossos carros poderiam realizar deslocamento utilizando uma tecnologia semelhante no futuro?

Podemos concluir que, quando o condutor está localizado no plano perpendicular ao das linhas de campo com $\alpha = 90°$ e as variáveis $i = 1\ A$, $l = 1\ m$ e $f = 1\ N$, a densidade de fluxo magnético $B = 1\ T$, assim, a força "$\overline{f}$" desenvolvida sobre o condutor percorrido pela corrente i pode ser representada conforme dado pela Figura 9:

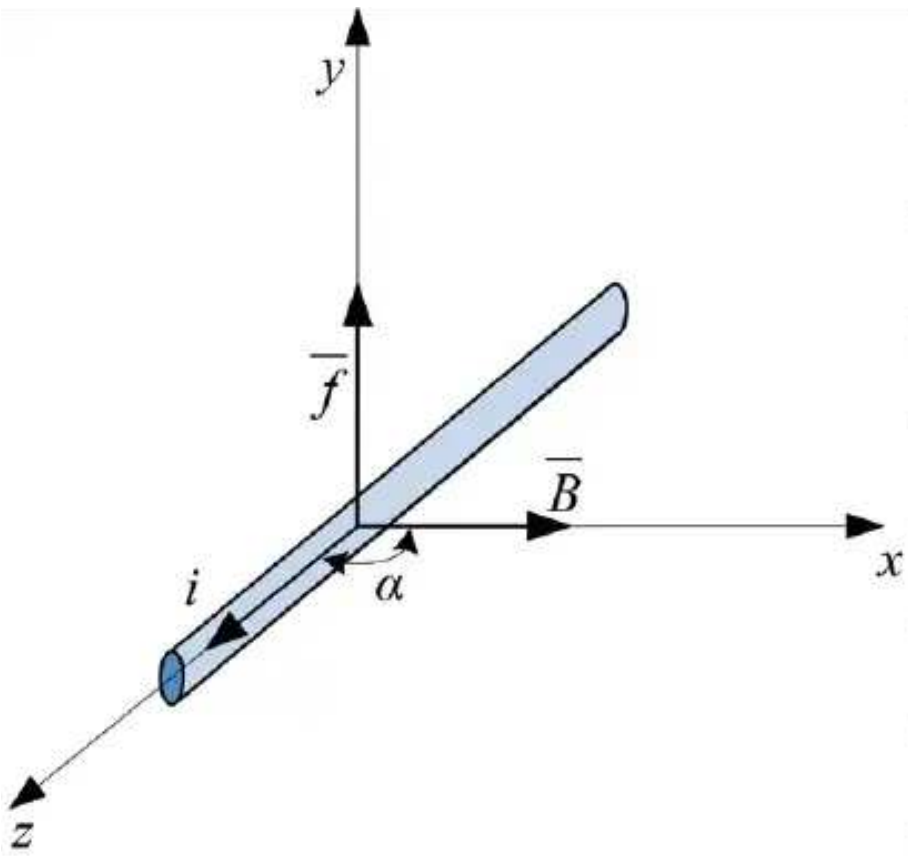


Figura 9 - Força produzida sobre condutor percorrido por corrente elétrica imerso em fluxo magnético
Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um condutor percorrido por uma corrente elétrica e a representação dos elementos força magnética, vetor densidade de fluxo magnético, corrente e ângulo formado entre a corrente e o vetor densidade de fluxo dispostos sobre o plano cartesiano tridimensional x, y, z.

A força magnética tem sua direção perpendicular à corrente que se alinha de acordo com a posição do condutor e consequentemente causa efeito na densidade de fluxo magnético.

A expressão que define o elemento de força ($d\overline{f}$) leva em consideração o produto vetorial dado na Equação 20:

$$d\overline{f} = i(d\overline{l} \times \overline{B})$$

Equação 20

O comprimento infinitesimal do condutor é dado pela variável $d\bar{l}$ que é representado por um vetor dirigido no sentido positivo da corrente (BIM, 2012). Caso $\bar{B}$ seja uniforme, então a força será determinada por:

$$df = idlB\ sen\alpha$$

Equação 21

Aproximando que idl é o elemento de corrente que flui pelo condutor, podemos assumir que il é a corrente total, que torna a força como sendo:

$$f = ilB\ sen\alpha$$

Equação 22

Esta relação permite concluir que a força magnética é uma interação entre o campo magnético produzido pela corrente elétrica e a densidade de fluxo magnético do meio onde o condutor foi submetido.

Considerando que o campo magnético do meio no qual o condutor está imerso possui uma direção definida, podemos analisar o comportamento da força magnética produzida pelo campo magnético do condutor percorrido por corrente. Observando a Figura 10, temos que a densidade de fluxo magnético é maior de um lado do que do outro do condutor, pois, ao interagir com o campo magnético do meio ao qual o condutor está submetido, as linhas de campo do meio possuem direção que pode coincidir com a direção das linhas de indução produzidas em torno do condutor. Deste modo, haverá maior densidade de fluxo magnético do lado que há alinhamento entre os sentidos de campo e menor intensidade da densidade de fluxo magnético onde há sentidos opostos.

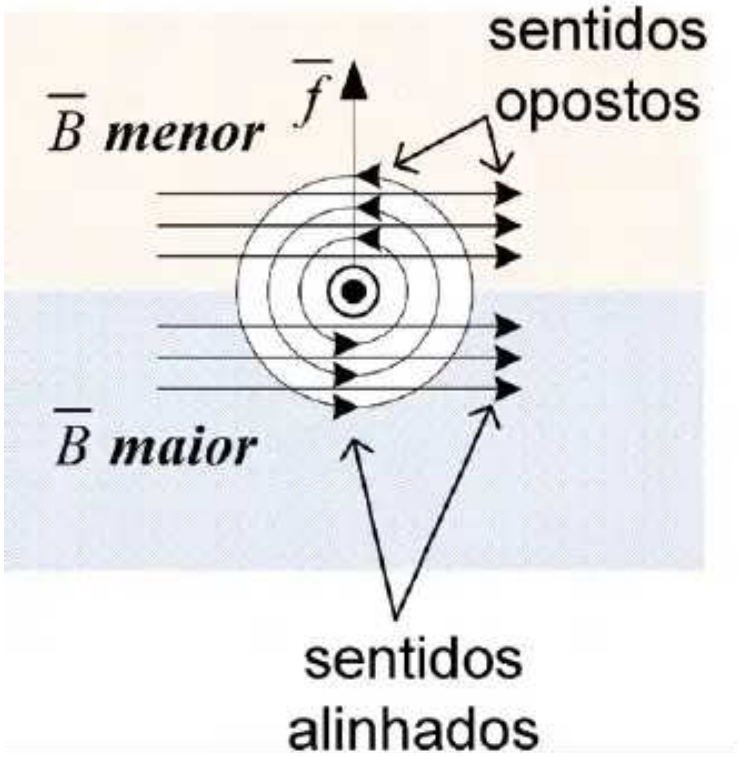


Figura 10 - Densidades de fluxo de maior e menor intensidade de acordo com o sentido do campo do meio
Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: a figura mostra a representação de um condutor elétrico em corte percorrido por corrente elétrica, produzindo um campo magnético com força "$\bar{f}$" e densidade de fluxo magnético variando de um lado com maior intensidade do condutor do que o outro lado, por conta do alinhamento ou oposição do sentido do campo magnético do meio ao qual o condutor está submetido.

Por outro lado, a força magnética é sempre crescente do lado de maior densidade de fluxo magnético para o lado de menor intensidade de $\overline{B}$.

Vamos interpretar um exemplo de campo magnético produzido em um toroide, que consiste em um enrolamento de fio em um núcleo em forma de anel (*toro*) constituído de material não condutor, utilizado para a fabricação de indutores em filtros de RFI (*Radio Frequency Interference* ou Interferência eletromagnética), transformadores de pulso etc.

Figura 11 - Exemplos de toroides - indutores e transformadores em núcleo de ferrite

Descrição da Imagem: esta figura mostra vários exemplos de toroides aplicados na composição de transformadores e indutores para atuação em circuitos de filtros e conversores estáticos, como fontes chaveadas, por exemplo.

Dado o toroide de raio "r" da Figura 12, considere que o módulo do campo magnético formado pelo círculo seja constante, temos que:

$$\overline{B}.\overline{ds} = B.ds$$

Equação 23

Como no caso do toroide, temos N vezes o condutor sendo enrolado no núcleo, devemos multiplicar a corrente por N para obter o valor de B:

$$I_{toroide} \Rightarrow NI$$

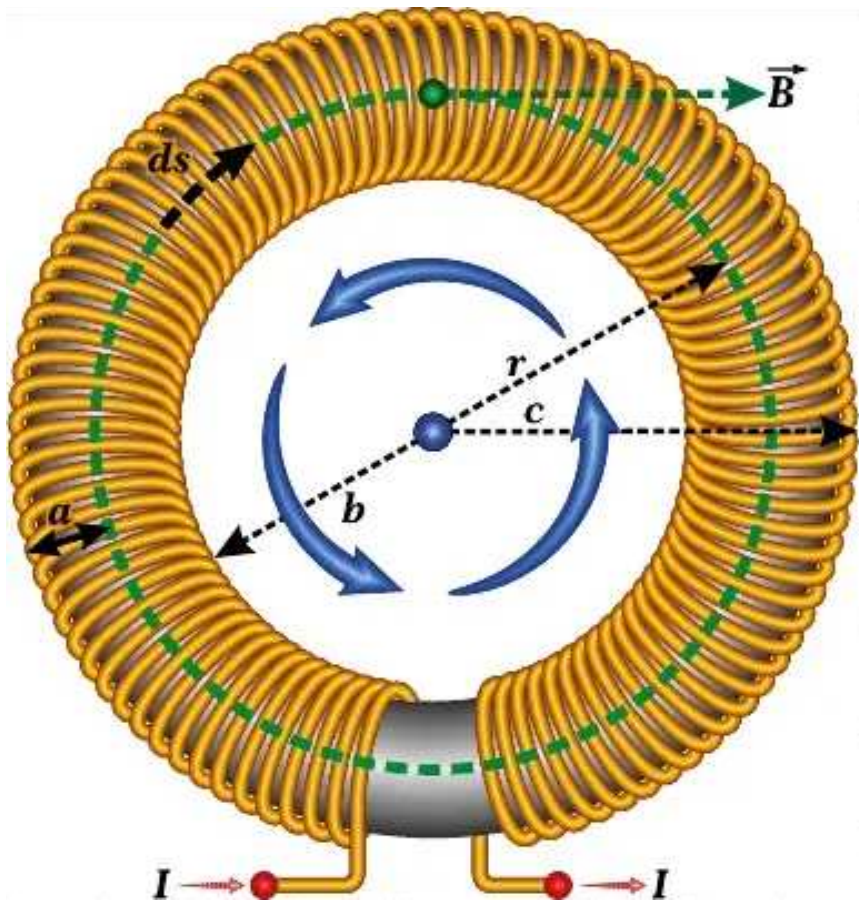


Figura 12 - Toroide e suas componentes dinâmicas

Descrição da Imagem: esta figura mostra um exemplo de toroide com enrolamento e fio esmaltado em que é possível verificar a corrente " I " sendo aplicada no enrolamento de fio e a identificação dos termos como raio do toro, o raio de seção transversal do toroide (a), os raios b e c e densidade de fluxo magnético.

Como já sabemos, utilizando a Equação 2 e a Equação 23, temos que:

$$\oint \bar{B}.d\bar{s}$$

$$B\oint ds = B(2\pi r) = \mu_0 NI$$

Assim, em termos de B, fica:

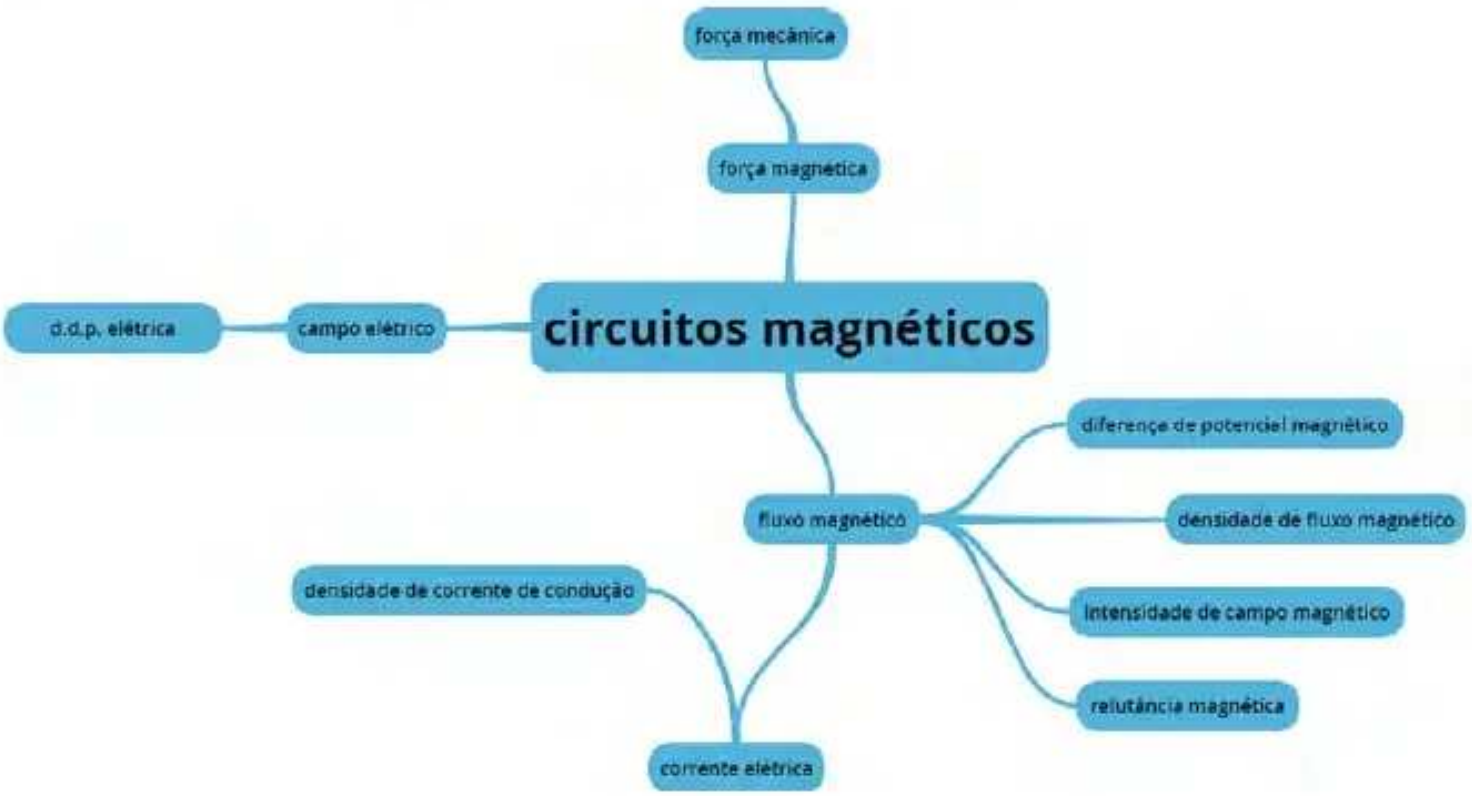
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

Equação 24

Podemos concluir que B varia com a relação I / r e, portanto, é não uniforme na região do toro; entretanto, se r for muito grande que possamos desprezar o raio a, então o campo magnético dentro do toroide é praticamente uniforme (SERWAY, 2011).

O estudante de conversão eletromecânica de energia utiliza os conceitos desta unidade para resolver problema como, por exemplo: analisar a capacidade de força de um campo magnético, interpretar a relação entre as principais variáveis elétricas e magnéticas e a equivalência entre elas, o que permite sua manipulação e controle, como, por exemplo, a variação de resistência elétrica que tem como resultado a variação de corrente que tem relação semelhante em um elemento magnético em que sua relutância determina o fluxo magnético através do meio. Com este conhecimento, o estudante poderá inferir se o fluxo magnético é suficiente para realizar as tarefas previstas para o elemento magnético ou se deve ser ampliado.

Olá, caro(a) estudante, vamos resgatar os principais temas estudados até esta etapa, relacionando cada variável com os circuitos magnéticos a partir da análise do mapa mental dado a seguir.



Agora que você já resgatou os principais termos estudados até aqui, produza seu próprio mapa mental com a definição dos fenômenos de cada relação entre as variáveis, associando os efeitos elétricos e magnéticos e identificando as equivalências entre cada tecnologia, por exemplo, a resistência em circuitos elétricos é equivalente à relutância em circuitos magnéticos.

MAPA MENTAL

1. Uma bobina enrolada em um núcleo toroidal com comprimento de 29 cm possui 100 espiras de fio de cobre esmaltado. Assinale a alternativa correta para o valor da intensidade de campo magnético no núcleo deste toroide quando a corrente contínua for de 0,0116 A, considerando-se o campo magnético uniforme.
   a) 56 A/m².
   b) 32 Wb/m.
   c) 4,2 A/T.
   d) 84 A/m.
   e) 4 A/m.

2. Um Engenheiro Eletricista, ao analisar o problema da questão 1, resolveu investigar o uso de outro toroide que deve produzir o mesmo campo magnético. Neste caso, qual seria a corrente para o novo arranjo de espiras e condutores?
   a) 20 A.
   b) 8,45 A.
   c) 0,116 A.
   d) 0,018 A.
   e) 2,54 A.

3. As máquinas elétricas utilizam princípios eletromagnéticos descobertos desde o início do século XIX e ainda assim são fabricadas e comercializadas de acordo com as contribuições de seus pesquisadores, como Faraday e Ampère. Sobre a tensão induzida em uma espira de metal condutor, assinale a alternativa correta.
   a) O valor da tensão induzida em uma espira de fio condutor é proporcional ao produto do número de linhas de força que passam através daquela espira e inversamente proporcional à integral de linha da intensidade de campo magnético.
   b) O valor da tensão induzida em uma espira de fio condutor é proporcional à razão de variação das linhas de força que passam através daquela espira.
   c) O valor da tensão induzida em uma espira de fio condutor é inversamente proporcional à densidade de fluxo que corta o condutor por um condutor próximo somada a sua relutância.
   d) A corrente do enrolamento secundário de um transformador toroidal é igual à força magnetomotriz de uma máquina elétrica com função de transferência de 3ª ordem.
   e) O valor da resistência induzida em uma espira de fio condutor é proporcional ao produto do raio do toroide vezes a corrente ao quadrado.

AGORA É COM VOCÊ

Circuitos Magnéticos – Análise de Parâmetros

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Caro(a) aluno(a), nesta unidade, você terá a oportunidade de aprender sobre a análise de circuitos magnéticos e o comportamento dinâmico de cada interação entre os elementos envolvidos, levando-se em consideração a teoria desenvolvida até esta etapa de nosso estudo, que permitirá interpretar e compreender os processos de conversão eletromecânica.

Você já utilizou algum eletrodoméstico que possua motor elétrico, por exemplo, um espremedor de frutas ou liquidificador, ou até mesmo uma furadeira elétrica, e em ambos os casos notou ao longo do uso que em determinadas situações o motor se mostrou enfraquecido por conta da carga aplicada e diminuiu sua rotação? Talvez seja pela fruta que foi pressionada duramente contra o espremedor, ou pelo produto muito denso que foi submetido ao liquidificador, ou pela parede dura que tentou furar utilizando aquela furadeira hobby de motor limitado.

Você também já deve ter visto algum eletroeletrônico que possui aquela "caixinha" que conectamos à tomada para converter a tensão da rede em algo do tipo 12 V ou 5 V e que, na maioria das vezes, é uma fonte de alimentação, em alguns casos, esquentando muito até que derretam as paredes do gabinete.

Você sabe o que muitas vezes limita a operação de uma máquina elétrica e quais situações podem colaborar para a perda de potência em elementos magnéticos que utilizamos, como no caso de motores ou transformadores, produzindo baixo rendimento, aquecimento excessivo e consequentemente perdas de energia?

Os materiais! Sim, os materiais utilizados! Esta é a resposta para todas as perguntas.

Parece simples, e na verdade é. A maioria dos elementos de máquinas elétricas podem ser fabricados com elevada eficiência, que remete à capacidade de converter a energia de entrada em energia útil de saída e com isso tornar a máquina elétrica (motor, transformador, solenoide etc.) mais econômica e viável, porém, muitos fabricantes de máquinas elétricas, para driblar a concorrência, comercializam produtos que são fabricados com materiais de baixa qualidade e, consequentemente, que não apresentam as características desejadas para que uma máquina seja eficiente, logo, deparamo-nos com equipamentos fabricados com materiais que não possuem os requisitos de qualidade necessários ao alto rendimento, como, por exemplo, transformadores e motores que utilizam chapas de aço-silício de baixa qualidade e que resultam em grandes perdas no processo de conversão eletromagnética de energia.

Quando um fabricante de chapas de aço-silício utiliza os melhores processos e matéria-prima, os resultados são motores e transformadores de alto rendimento, com baixíssimas perdas e máxima transferência de energia para a carga. Com motores e transformadores mais eficientes, temos máquinas mais econômicas, produzindo menos ruído, ocupando menos espaço, dissipando menos calor. Tudo graças à utilização dos materiais certos na proporção correta.

Quando um motor elétrico de uma máquina industrial apresenta diminuição de seu torque quando submetido à carga excessiva, entendemos que este está se comportando conforme o previsto, porém, quando uma máquina elétrica está operando dentro de seus limites operacionais e mesmo assim apresenta aquecimento e emissão de ruídos, certamente estamos diante de uma situação preocupante, pois este equipamento pode ter perdas em sua estrutura que podem "atrasar" o processo de troca de energia entre a densidade de fluxo magnético e a força magnetomotriz associada, como no caso da histerese inerente às chapas de aço-silício.

Há diversas perdas envolvidas no processo de conversão eletromecânica e nesta unidade iremos estudar as principais perdas associadas à análise de circuitos magnéticos para que possamos entender sua origem e impacto sobre as variáveis qualitativas neste processo de conversão de energia.

Neste momento, iremos realizar uma experimentação que remete ao uso de um ímã e 20 clips de papel de tamanho médio e uma resma de papel A4 comum. Esta experimentação pretende observar a influência da variação da distância entre o campo magnético natural do ímã e a capacidade de atração dos clips de papel.

Primeiramente você deve testar quantos clips de papel o seu ímã é capaz de atrair, sendo um clip ligado magneticamente ao outro, de modo que um está atraindo ao outro e formando uma "corrente" de clips, dependentes da força de atração do ímã. Feito isso, anote o número de clips que seu ímã foi capaz de atrair.

Agora, insira 20 páginas de papel entre o ímã e os clips e anote a quantidade de elementos que o ímã foi capaz de atrair e anote o resultado.

Repita este procedimento aumentando o número de páginas para 40, 80, 100 e 200 páginas de papel A4.

Você deverá notar a diminuição da capacidade de atração de clips de papel na medida em que a distância (e demais características de absorção de campo que o material do papel possa ter) aumenta entre o ímã e os clips. Este efeito é semelhante ao processo de perdas que muitas máquinas elétricas apresentam e que devem ser minimizadas.

Por que o campo magnético de uma fonte natural de linhas de campo diminui com a distância? O que essa limitação tem a ver com nossa experimentação envolvendo ímã, clips e papel A4?

Você deve entender que há um parâmetro vital a ser analisado nos materiais que compõe as chapas de aço dos transformadores, por exemplo, a histerese.

Para a nossa reflexão, você, estudante, deverá realizar uma pesquisa na internet sobre a **histerese** presente nas diferentes ligas que são utilizadas para a fabricação de chapas de aço-silício voltadas à produção de transformadores e motores.

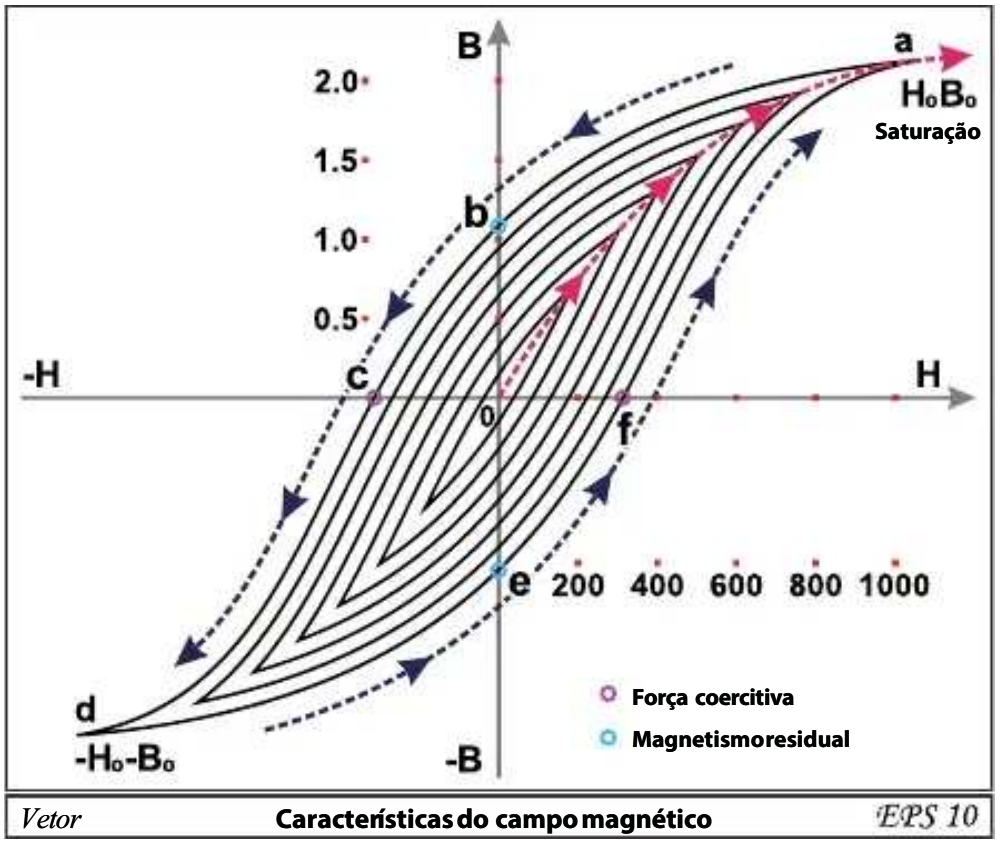


Figura 1 - Gráfico da histerese em material submetido ao campo magnético

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um gráfico B/H (fluxo magnético no domínio da força magnetomotriz) no qual estuda-se a variação da corrente de magnetização e consequente produção de campo magnético que tem seu crescimento no primeiro quadrante e decréscimo cíclico com atraso no quarto quadrante, nova variação, porém negativo no terceiro quadrante e decréscimo por meio do segundo quadrante ligando-se novamente ao primeiro quadrante. Este comportamento remete à histerese, que nada mais é do que um atraso que o material do núcleo de chapas apresenta intrinsecamente e remete às perdas para o elemento magnético.

As ligas a serem observadas são:

- Ferro puro sinterizado.
- Ferro puro associado a fósforo com concentração variando entre percentuais de 1, 2 e 3%.
- Ferro puro associado a silício com concentração variando entre percentuais de 1, 3 e 5%.
- Ferro puro associado a níquel com concentração percentual de 50%.

Você deve concluir que diferentes materiais possuem diferentes níveis de histerese e que este fator pode implicar diretamente sobre o desempenho das máquinas elétricas.

DIÁRIO DE BORDO

Dando sequência aos estudos que realizamos na unidade anterior, iremos iniciar nesta etapa o estudo e a análise de circuitos magnéticos levando em consideração as suas limitações e principais relações de perdas envolvidas no processo de conversão eletromecânica de energia.

Para ilustrar a análise de circuitos magnéticos, iremos introduzir o conceito de geração de tensão elétrica, base para os estudos de alternadores e funcionamento de máquinas rotativas que iremos abordar mais adiante neste livro.

A geração de tensão elétrica teve sua descoberta feita por Michael Faraday no ano de 1831 (KOSOW, 2005). A partir daí, **vários** outros pesquisadores seguiram no desenvolvimento de tecnologias que até hoje movem o nosso mundo, permitiram e permitem a criação de máquinas e processos necessários ao funcionamento de sistemas baseados em energia elétrica, as revoluções industriais, a indústria 4.0, as pesquisas espaciais, os equipamentos médicos, os veículos elétricos, os sistemas de geração de energia elétrica, entre tantos confortos que podemos desfrutar na atualidade.

Faraday descobriu que o movimento relativo entre um campo magnético e um condutor de eletricidade era capaz de gerar tensão elétrica, a qual foi denominada de "tensão induzida", pois só ocorria enquanto mantido o movimento relativo entre o campo magnético e o condutor (KOSOW, 2005).

A Figura 2 mostra a ideia inicial e os detalhes do experimento realizado por Faraday.

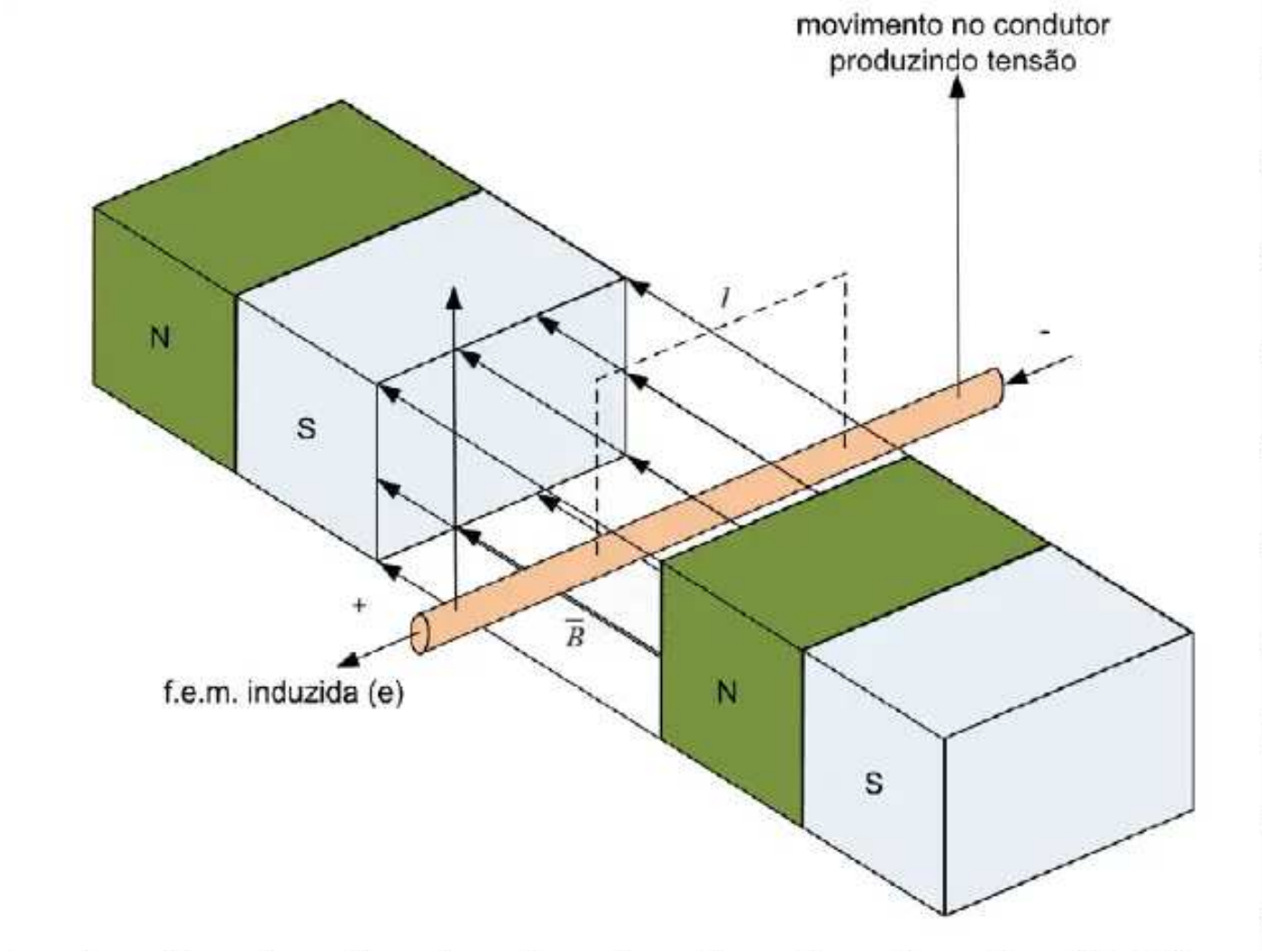


Figura 2 - Experimento de Faraday - tensão produzida por movimento de condutor em campo magnético
Fonte: adaptada de Kosow (2005).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta o experimento de Faraday, que consiste em promover o movimento relativo entre um condutor metálico e um campo magnético produzindo como resultado a d.d.p. em V nas extremidades do fio. A imagem mostra dois ímãs alinhados, posicionados a uma pequena distância entre si, com o polo Norte de um apontando para o polo Sul do outro, de modo que linhas de campo magnético, $\overline{B}$, fluam entre os referidos polos (de Norte para Sul), região onde um condutor metálico é introduzindo cortando as linhas de campo magnético e gerando tensão em seus terminais. Com este experimento, foi definida a Lei de Faraday.

A lei de Faraday afirma que:
"O valor da tensão induzida em uma simples espira de fio é proporcional à razão da variação das linhas de força que passam através daquela espira".
Fonte: Kosow (2005, p. 4).

A lei de Faraday nos permite dizer que a tensão induzida (força eletromotriz – f.e.m.) é diretamente proporcional à variação do fluxo concatenado, que matematicamente podemos escrever como (KOSOW, 2005):

$$E_{med} = \frac{\phi}{t}.10^{-8}\ V$$

Equação 1

Onde temos que "E_{med}" é a tensão induzida dada em V ,"ϕ" é o número de linhas de força magnética concatenadas pela espira durante um intervalo de tempo "t" e 10^{-8} é o número de linhas que uma espira deve concatenar por segundo para que ocorra a indução de $1\,V$. Assim, podemos interpretar que, para aumentar a tensão induzida, podemos manipular a quantidade de linhas de força magnética ou produzir movimento que permita a concatenação de mais linhas por segundo à espira de modo que a tensão irá variar na medida em que a velocidade de concatenação de linhas também varie.

Neste primeiro caso, devemos considerar que o circuito magnético é o mesmo desde o início até o fim do processo de conversão, o que em algumas máquinas não ocorre, por este motivo é conveniente adotar que a tensão induzida é função da densidade média do fluxo magnético $\overline{B}$, sendo que E_{med} também depende da velocidade v (que pode variar no tempo) e do comprimento efetivo "l" da espira, que realmente concatena linhas de indução. Assim, matematicamente podemos afirmar que a **tensão instantânea induzida** "e" é (KOSOW, 2005):

$$e = \overline{B}lv.10^{-8}\ V$$

Equação 2

Ainda, podemos entender que a força eletromotriz (fem) gerada através de uma trajetória fechada é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético, este que está passando pela área da bobina, assim, matematicamente a lei de Faraday tem a seguinte representação (BIM, 2012):

$$fem = \frac{dN\Phi(t)}{dt} = \frac{d\psi(t)}{dt}$$

Equação 3

Em que N é o número de espiras da bobina de fio e ψ é o **fluxo magnético concatenado** pela bobina.

$$\psi(t) = N\Phi(t)$$

Equação 4

Esta representação matemática nos permite concluir que, quanto maior o número de espiras de uma bobina, maior será o valor da tensão gerada. Por outro lado, caso a densidade de fluxo magnético seja uniforme e a superfície de propagação for plana, teremos o fluxo magnético dado pela expressão dada na Equação 5, onde "A" é a área efetiva por onde ocorre o fluxo magnético:

$$\Phi = \overline{B}.\overline{A} = B.A.\cos\theta$$

Equação 5

Contudo, ao considerarmos a área e a densidade de fluxo variáveis no tempo, temos a expressão que define a tensão gerada (Equação 6):

$$e_b = N.A.\cos\theta \frac{dB}{dt} - N.B.A\frac{d\theta}{dt} sen\theta + N.B\cos\theta \frac{dA}{dt}$$

Equação 6

Podemos considerar que a maioria das máquinas elétricas que operam com geração de energia atuam com a variação de densidade de fluxo magnético ou a variação da posição com relação ao fluxo magnético (ou movimento relativo entre o condutor da espira). Desta forma, temos para as bobinas estacionárias as seguintes relações:

$$\frac{dA}{dt} = 0$$

Equação 7

$$\theta = \frac{\pi}{2}$$

Equação 8

$$\frac{d\theta}{dt} = 0$$

Equação 9

Em que o fluxo magnético varia com comportamento senoidal, dado pela função:

$$\Phi(t) = \phi_{pico} sen(\omega t)$$

Equação 10

E a **força eletromotriz** gerada fica:

$$e_b = \omega N \phi_{pico} \cos(\omega t)$$

Equação 11

Considere a Figura 3, em que temos a representação de um gerador de tensão elétrica. Os polos "N" e "S" produzem fluxo magnético que ocorre de Norte para Sul e, então, consiste em um dado volume magnético no qual está imersa a espira de fio. Como consequência da imersão deste condutor no fluxo magnético, há o surgimento de uma f.e.m. que aplicada a uma lâmpada pode produzir luz, graças ao fenômeno da indução eletromagnética.

GERADOR SIMPLES DE CORRENTE ALTERNADA

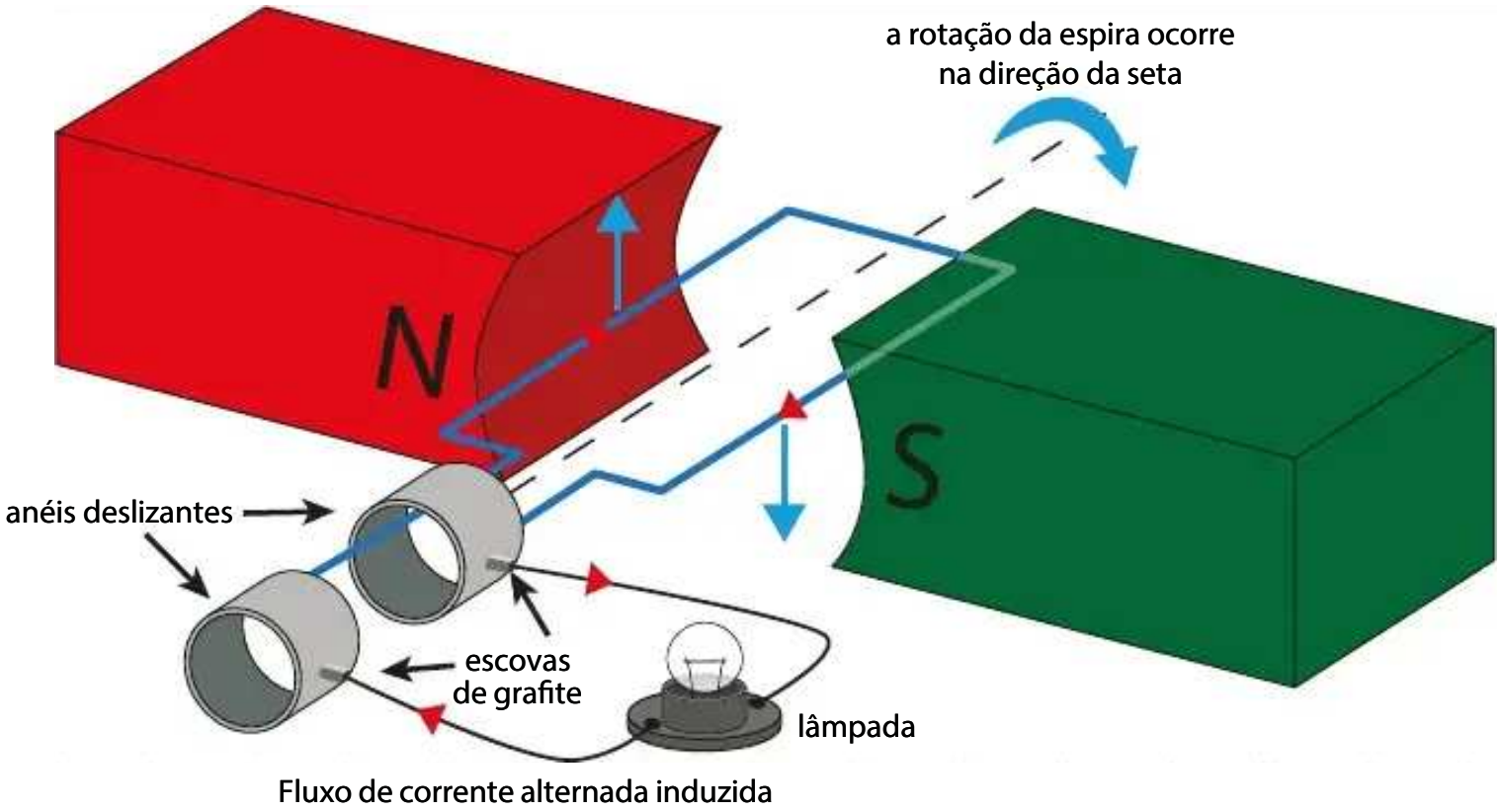


Figura 3 - Princípio de geração de energia elétrica

Descrição da Imagem: esta figura mostra o princípio de um gerador de tensão alternada, onde há dois ímãs, sendo que entre o polo Norte de um e o polo Sul do outro há uma espira de fio que é capaz de entrar em movimento dado pela relação de fluxo magnético presente. Além disso, a espira está conectada a anéis deslizantes em seus terminais que permitem a ligação de cargas (que neste caso é uma pequena lâmpada) utilizando-se escovas de carvão. É possível identificar o sentido da corrente elétrica alternada induzida.

Quando estudamos a máquina elétrica da Figura 3, devemos adotar que, quando a espira girar com velocidade ω_r, considerando-se $t = 0$, teremos que o eixo da bobina está alinhado com o eixo de quadratura estacionário "q", onde a posição angular do eixo é dada por:

$$\theta r = \omega r t$$

Equação 12

Logo, o fluxo concatenado pela bobina (ψ_b), quando imerso em meio a um fluxo magnético uniforme (caso do exemplo entre os ímãs), depende da posição do seu eixo, pois de acordo com a variação de posição relativa entre a espira e as linhas de campo, temos uma variação na tensão induzida. Daí a relação analítica:

$\psi_b = 0$ quando $\theta_r = 0$

$\psi_b = N\phi_0$ quando $\theta_r = \pi/2$

Assim, admitindo-se um fluxo magnético concatenado pela espira senoidal, a expressão para o fluxo concatenado fica:

$$\psi_b = N\Phi_0 sen(\omega_r t)$$

Equação 13

Ao aplicarmos a lei de Faraday, temos que a f.e.m. gerada fica:

$$e_b = N\Phi_0 \cos(\omega_r t)$$

Equação 14

Podemos concluir, então, que a tensão gerada será igual a zero quando a velocidade $\omega_r = 0$ e que, ao ter circulação de corrente pela bobina, teremos queda de tensão em seus condutores que depende diretamente da resistência ôhmica deles. Assim, a **diferença** entre a **tensão instantânea** "$v_b(t)$" e a **tensão gerada** internamente "$e_b(t)$" é a **queda de tensão sobre a bobina**. Logo:

$$v_b(t) - e_b(t) = r_b.i(t)$$

Equação 15

Sendo $r_b.i(t) = v_{rl}$, ou, queda de tensão sobre a bobina de comprimento "l".

Figura 4 - Homem inspecionando as bobinas do estator de uma máquina síncrona - gerador de tensão alternada

Descrição da Imagem: esta figura mostra um grande estator de uma máquina síncrona com um homem posicionado em seu interior, inspecionando suas bobinas.

Até aqui estudamos sobre detalhes relevantes envolvendo o fluxo magnético e sua densidade, o número de espiras de uma bobina e até mesmo relações de velocidade relativa entre condutor e fluxo magnético, entretanto, há uma informação importante para estudarmos que remete à produção de campo magnético.

O vetor **intensidade de campo magnético** "$\overline{H}$" remete à capacidade que uma fonte de campo magnético apresenta em magnetizar um meio qualquer, sendo, portanto, função da corrente total do circuito, uma vez que é responsável por estabelecer o fluxo magnético com densidade $\overline{B}$.

Uma técnica utilizada para produzir altos níveis de densidade de campo magnético é aplicando corrente alternada em condutores acomodados em forma de bobinas com núcleo de material magnético, assim, o enrolamento de um solenoide apresenta a relação dada na Equação 16, onde N é o número de espiras de comprimento l:

$$N/l$$

Equação 16

Considerando que cada uma das espiras é percorrida por uma corrente i, que resulta na geração do fluxo magnético de densidade B, fica:

$$B_0 = \mu_0 \overline{H}$$

Equação 17

Em que $\overline{H}$ é o vetor intensidade de campo magnético.

Entretanto, se um material ferromagnético é inserido no interior da bobina, a densidade de fluxo magnético passa a contar com mais uma componente associada à orientação dos domínios do material, daí B_0 passa a ser:

$$B_0 = \mu_0 \overline{H} + \mu_0 \overline{M}$$

Equação 18

Em que $\overline{M}$, medido em A/m, é o **vetor intensidade de campo magnético que foi produzido pela orientação dos domínios magnéticos do material** e é fator não-linear de H (BIM, 2012). Este efeito tem influência direta sobre a histerese do material, que iremos estudar mais adiante neste livro.

A Figura 5 mostra um exemplo do fenômeno de orientação de material magnético policristalino e apresenta a orientação dos domínios magnéticos, que são regiões microscópicas do material onde os átomos são polarizados em determinada direção. Como resultado disso, essas porções de material consistem em pequenos ímãs.

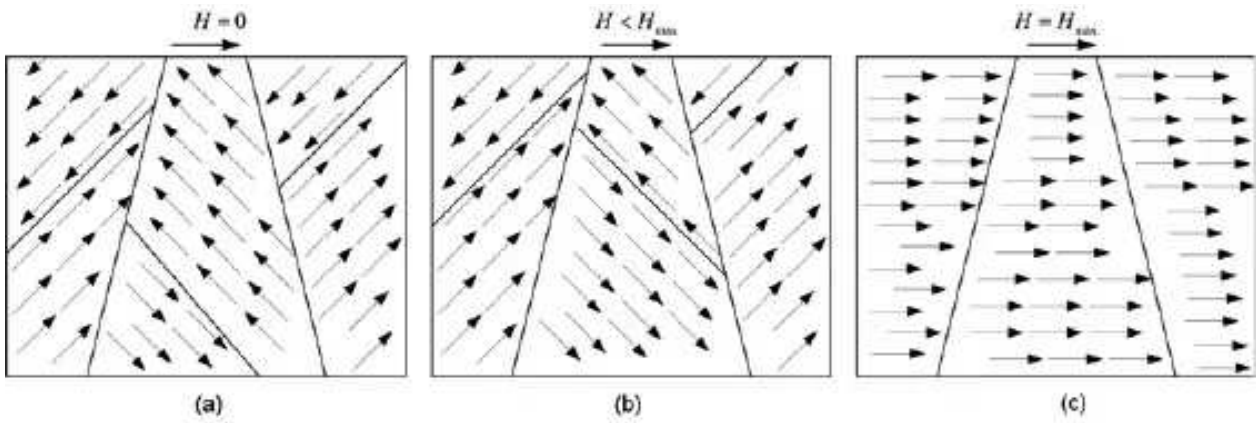


Figura 5 - Fenômeno de orientação de material magnético policristalino: (a) polarização independente em diferentes áreas do mesmo material, (b) início da orientação parcial dos domínios e (c) porção totalmente alinhada após a rotação dos momentos magnéticos / Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: nesta figura, há três exemplos de porções de materiais com orientações dos seus domínios magnéticos. A primeira região (a) apresenta $H = 0$, a segunda (b) é quando $H < H_{max}$ e a terceira (c) mostra a orientação para $H = H_{max}$. Nas diferentes situações, a orientação dos domínios magnéticos depende da intensidade do campo magnético e as setas estão com orientação diferente em diferentes regiões da porção em (a), ainda com diferentes, porém mais orientadas em (b) e definitivamente orientadas em (c) em uma direção distinta.

Você já precisou atrair um pequeno parafuso com uma chave de fendas para inseri-lo em um furo? Você pode imantar sua ferramenta a partir do campo magnético de um ímã ou de uma bobina, orientando os domínios magnéticos do metal da ferramenta.

Os efeitos do campo magnético sobre uma porção de metal podem resultar na orientação de seus domínios magnéticos (indicados pelas setas) e com isso este metal então passa a apresentar orientação magnética que antes não possuía, pois não havia uma polarização orientada de todos, ou da maioria dos seus átomos. Esta propriedade confere a capacidade de magnetização de metais como ferramentas, por exemplo, a fim de que possam atrair outros metais e assim facilitar tarefas de posicionamento.

A região da Figura 5 em (a) apresenta $H = 0$, quando o material ainda não está magnetizado, ou seja, não teve orientação magnética definida. Na Figura 5 (b), o material passa por um momento onde $H < H_{\max}$ e com isso teve uma magnetização parcial, resultante do alinhamento e polarização de parte de seus átomos. Já na Figura 5 (c), o metal foi totalmente orientado, logo temos $H = H_{\max}$, onde podemos afirmar que houve **saturação magnética**.

Nas diferentes situações, a orientação dos domínios magnéticos depende da intensidade do campo magnético e as setas estão com orientação diferente em diferentes regiões da porção em (a), ainda com diferentes, porém mais orientadas em (b) e definitivamente orientadas em (c) em uma direção distinta.

As separações entre os diferentes domínios são as linhas contínuas denominadas "**paredes dos domínios**".

"Quando é fácil formar e mover paredes de domínios magnéticos do material pela aplicação de um campo magnético externo, ele é conhecido por material magneticamente macio, e se ao contrário, o material apresentar dificuldades de formação e deslocamento das paredes dos domínios magnéticos, será dito magneticamente duro."
Fonte: Bim (2012, p. 11-12).

A princípio, o processo de magnetização orienta os domínios do material em uma direção e com isso esta porção de metal ferromagnético passa a apresentar características de um ímã, mas como reverter este processo? Para desmagnetizar o material, é necessário desorientar novamente os seus domínios magnéticos e geralmente isso pode ser obtido a partir de altas temperaturas ou de imersão da porção metálica em fluxo magnético de diversas orientações, que pode ser encontrado em ferramentas específicas de desmagnetização.

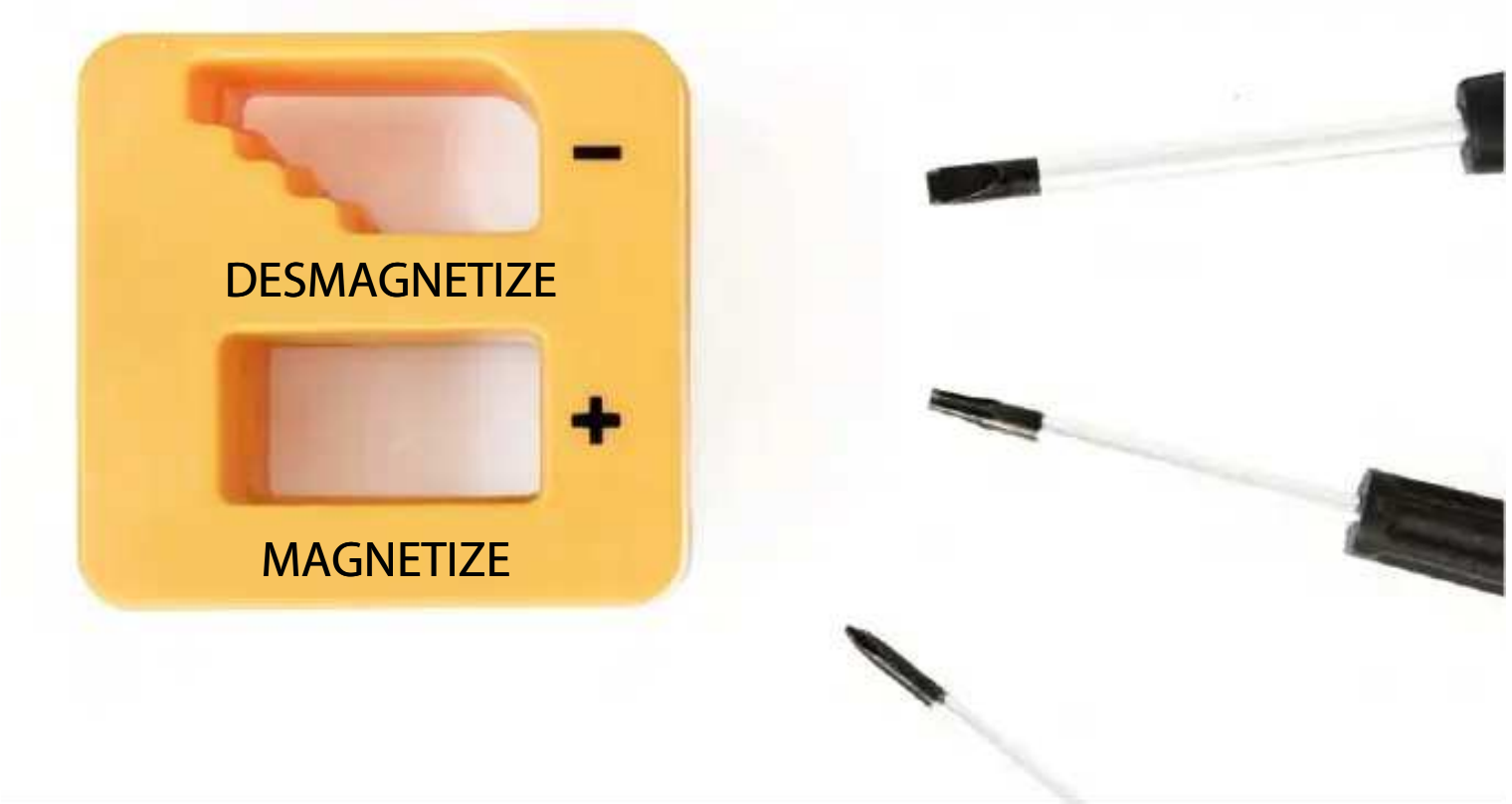


Figura 6 - Desmagnetizador e magnetizador de ferramentas

Descrição da Imagem: esta figura mostra a foto de um desmagnetizador e magnetizador de ferramentas que pode orientar e desorientar os domínios magnéticos do material ferromagnético de chaves de fenda. Há também três chaves de fenda à direita do desmagnetizador, sendo mais acima uma chave de fenda reta, outra, abaixo da anterior, torque e por último uma chave de fenda cruzada.

Aprendemos que a densidade de fluxo depende diretamente do tipo de material utilizado em seu núcleo, já que temos o surgimento de um componente adicional à intensidade de campo magnético aplicado "H" (aquele que surge em torno do condutor em linhas concêntricas, conforme vimos na Figura 7 da Unidade 3 deste livro), a intensidade de campo magnético causado pela orientação dos domínios magnéticos do material "M".

Este fato implica diretamente sobre uma característica inerente dos materiais magnéticos que é a histerese, mas antes de estudar este tema, precisamos entender um pouco sobre os materiais e alguns termos como χ, que vamos chamar de "**suscetibilidade magnética**", que é um fator adimensional e determina a capacidade de um material em magnetizar-se quando submetido a um campo magnético, do qual é dependente. Daí começamos pela definição matemática que determina:

$$\overline{M} = \chi \overline{H}$$

Equação 19

Desta forma, temos que $\overline{B}$ passa, então, a ser definido como:

$$B = \mu_0 \overline{H} + \mu_0 \chi \overline{H}$$

Equação 20

Ou, de forma simplificada:

$$B = \mu_0 \overline{H}(1 + \chi)$$

Equação 21

O que nos permite definir como permeabilidade relativa, a relação:

$$\mu_r = \frac{\overline{B}}{\mu_0 \overline{H}} = 1 + \chi$$

Equação 22

Logo, o campo magnético total " B " fica:

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

Equação 23

Em que μ_c é a **permeabilidade do material** em questão dada por:

$$\mu_c = \mu_r \mu_0$$

Equação 24

Quando estudamos campos magnéticos aplicados, devemos levar em consideração que há uma interface denominada superfície entre os meios definidos como μ_c e μ_0, que é o espaço livre de permeabilidade. Dada essa região **é que devemos estudar as condições de contorno** dos vetores **intensidade de fluxo magnético** e **intensidade de campo magnético**.

> "O número de linhas de fluxo magnético que entram em uma superfície é igual ao número de linhas de fluxo magnético que saem dessa mesma superfície". Desta forma, podemos concluir que as linhas de fluxo magnético são linhas fechadas.
> Fonte: Bim (2012, p. 12).

A Equação 25 expressa a propriedade que as linhas de fluxo magnético são linhas fechadas.

$$\oint_S \overline{B}.d\overline{a} = 0$$

Equação 25

É importante ressaltar que há classificação entre os diferentes materiais de acordo com os valores de χ, assim podemos estabelecer parâmetros importantes que resultam no uso de cada material para seu fim distinto.

Na maioria dos materiais sólidos, χ **é dado entre** -10^{-5} e 10^{-3}, permitindo determinar as classes de materiais:

Materiais diamagnéticos: apresentam $\chi < 0$, a magnetização $\overline{M}$ se opõe ao campo magnético aplicado $\overline{H}$, consequentemente, quando este material estiver imerso em um campo magnético, teremos $B < 0$. Esses materiais são repelidos por ímãs. **São exemplos cobre, bismuto, carbono, prata, ouro, mercúrio, chumbo e zinco.**

O nióbio, mercúrio, titânio e o tungstênio são materiais diamagnéticos com $\chi = -1$, os quais podem apresentar propriedades de supercondutores quando submetidos a uma temperatura crítica. Essa propriedade também é encontrada em algumas ligas derivadas desses elementos.

Materiais paramagnéticos: são aqueles onde $\chi > 0$. Nesse caso, os vetores $\overline{M}$ e $\overline{H}$ **têm o mesmo sentido** e o material passa a não apresentar características magnéticas, ou seja, tem suscetibilidade ínfima.

São exemplos de materiais paramagnéticos o alumínio, cromo, potássio, manganês, sódio e zircônio.

Materiais magnéticos: esses materiais apresentam altos valores de M, resultando em altos valores de χ, assim os valores de permeabilidade relativa "μ_r" variam entre 10^{-2} e 10^{6}. São exemplos o ferro, o cobalto, níquel, gadolínio, disprósio e algumas ligas de óxido derivados destes elementos.

Assim podemos aprofundar nosso estudo em torno da histerese contida em um material magnético analisando alguns parâmetros que podemos observar a partir da curva " BH " dada na Figura 9 (mais à frente nesta unidade).

Considere uma bobina $L1$ percorrida por uma corrente i senoidal, onde temos o ciclo composto de regiões de valores positivos e negativos de $i(t)$, passando por zero de acordo com a frequência do sinal.

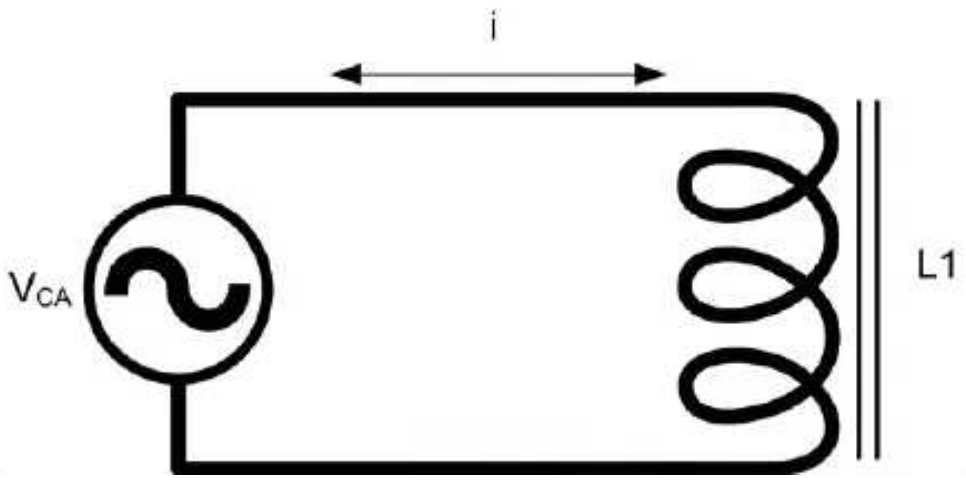


Figura 7 - Circuito magnético de uma bobina conectada a uma fonte de tensão alternada / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra um circuito magnético onde um indutor "L1" é associado a um gerador de tensão alternada.

Para recordarmos de como se dá o sinal de corrente alternada, analise a Figura 8 onde podemos ver à esquerda uma representação de um gerador de tensão alternada onde um fluxo magnético é produzido por uma corrente aplicada na bobina de seu rotor e com movimento, fluxo este que induz a tensão alternada que varia sua amplitude no tempo de acordo com a velocidade angular de rotação do rotor.

Note que o sinal é periódico dado às limitações da máquina elétrica que percorre um ciclo e, ao final deste, reinicia o processo de 0 à 360º, o que corresponde a uma variação de corrente no circuito da Figura 7, com variação de intensidade de **mínimo até máximo de acordo com o sinal da tensão aplicado** ao indutor $L1$.

UNICESUMAR

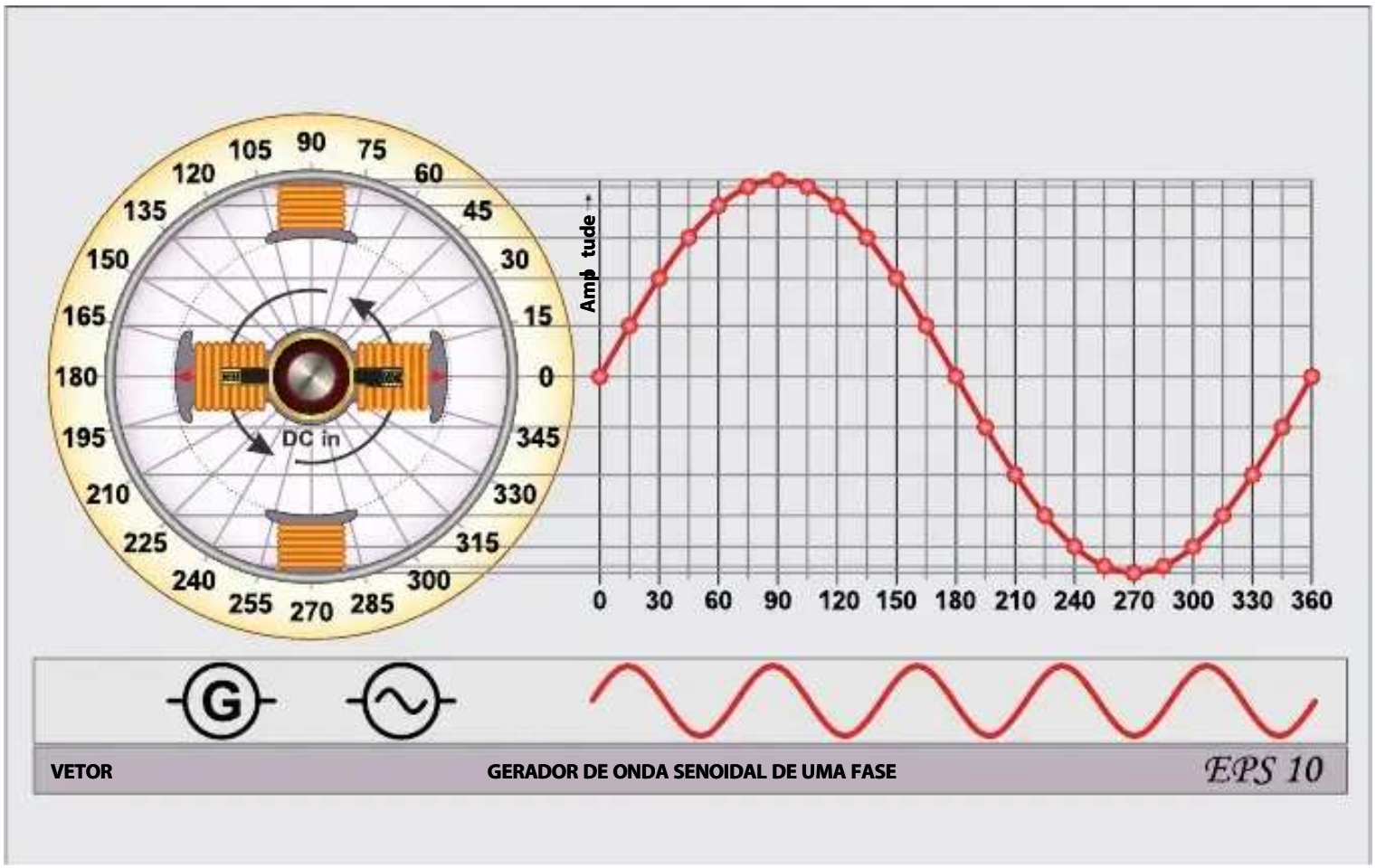


Figura 8 - Geração de sinal alternado

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação de um gerador de tensão alternada, onde o sinal produzido é uma senoide variando de 0 a um valor máximo de tensão para valores entre $0°$ *e* $180°$ e valores negativos de tensão para ângulos de $181°$ *até* $360°$.

Neste Podcast, iremos falar sobre a circulação de corrente pelo condutor de um indutor e o surgimento de fluxo magnético alinhado com a curva de histerese. Não deixe de ouvir!

Como consequência da variação da corrente no indutor, considerando que $L1$ está enrolado em um núcleo de material ferromagnético, notamos o surgimento de fluxo magnético B e uma intensidade de campo H, que definem o gráfico da Figura 9.

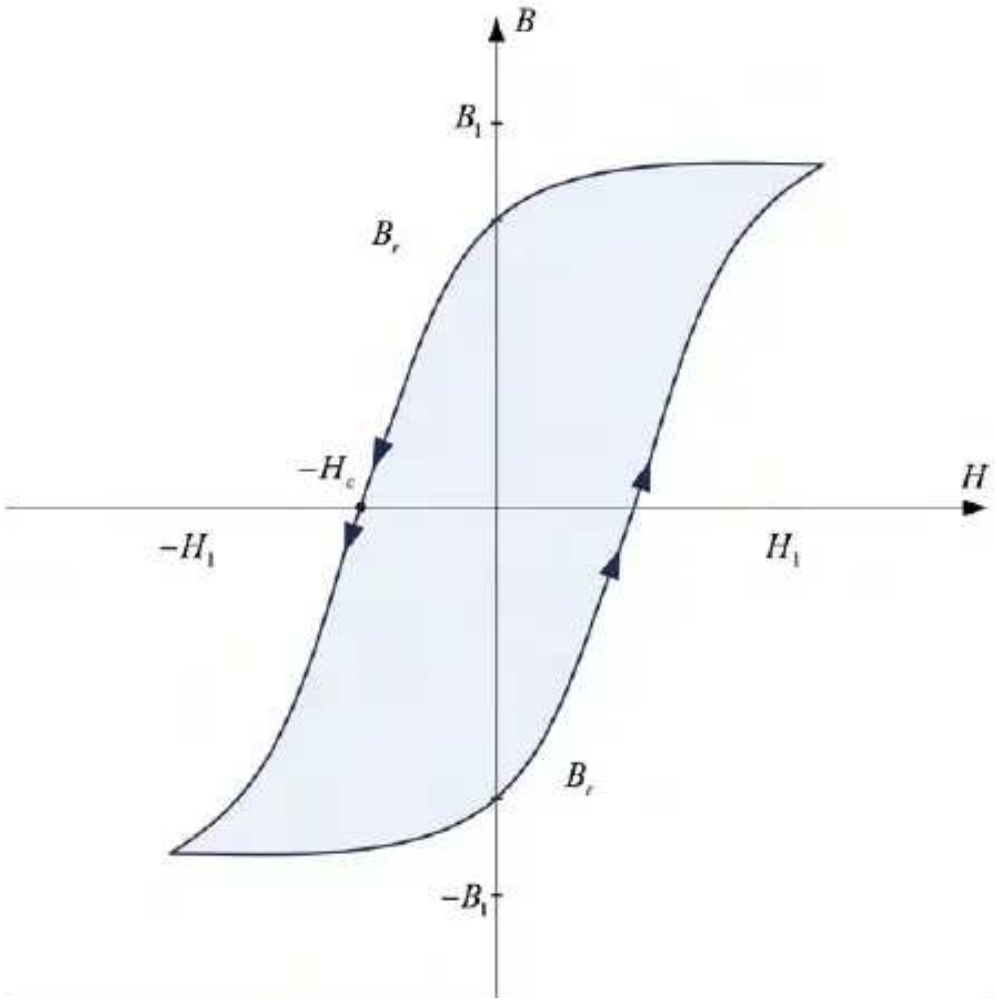


Figura 9 - Curva de magnetização em um material ferromagnético
Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um plano cartesiano com valores do eixo y representados pela intensidade de fluxo magnético "B" e no eixo x, a intensidade de campo magnético "H", gráfico este onde está plotado um gráfico do comportamento da histerese representado por uma curva que percorre os quatro quadrantes onde há o aumento para valores positivos de B e H até determinado limite (B1), em que ocorre sua diminuição atrasada até zero e seu decréscimo para valores de B e H, de tal forma que, após atingir um determinado limite simétrico ao positivo (-B1), retorna a zero e retoma novamente o crescimento inicialmente citado.

Na Figura 9, podemos observar que o gráfico representa o crescimento de valores de B e H de acordo com valores crescentes de corrente i variando de $0°$ a $90°$. Entretanto, quando a corrente varia de $90°$ até $180°$, não ocorre a diminuição de B e H pelo mesmo caminho por onde esses valores cresceram inicialmente, pois o material do núcleo onde $L1$ está enrolado, magnetizou-se quando submetido ao fluxo B e, consequentemente, orientou seus domínios magnéticos.

Quando a corrente i atinge valor igual a zero, a densidade de fluxo magnético B não **é igual** a zero, o que confere o termo densidade de fluxo magnético remanescente "B_r", caracterizando um atraso de B em relação à H, definindo o termo *histerese magnética*, que deriva da palavra grega "*υστέρησις*" que significa retardo ou atraso.

J**á** para o ângulo do sinal senoidal da corrente que flui por $L1$ (valores negativos de corrente) com valores superiores a $180°$ e menores ou iguais a $360°$, o fluxo B tem valores negativos e diminui até atingir o seu mínimo, repetindo o mesmo processo de crescimento inicial, com valores invertidos de B e H, onde retorna por outro caminho de valores de B e H até encontrar o valor da corrente i com valor igual a zero.

Deste ponto em diante, há o início de um novo ciclo de corrente e como consequência disso, de crescimento da relação B e H, onde na Figura 9 podemos verificar as setas que representam os sentidos de crescimento e diminuição conforme o ciclo de corrente alternada que percorre o indutor.

A histerese **é** a área abaixo da curva dada na Figura 9 e consiste na característica do material que compõe o núcleo magnético em conservar suas propriedades mesmo na ausência de estímulos que a causaram (B e H) implicando em um tipo de perda de energia durante o processo de conversão eletromagnética de energia, pois promove aquecimento no núcleo, no caso de indutores de transformadores, por exemplo.

A corrente coercitiva é um valor de i que anula a densidade de fluxo magnético e ocorre durante o ciclo negativo da corrente, também definido como campo coercitivo ou "H_c".

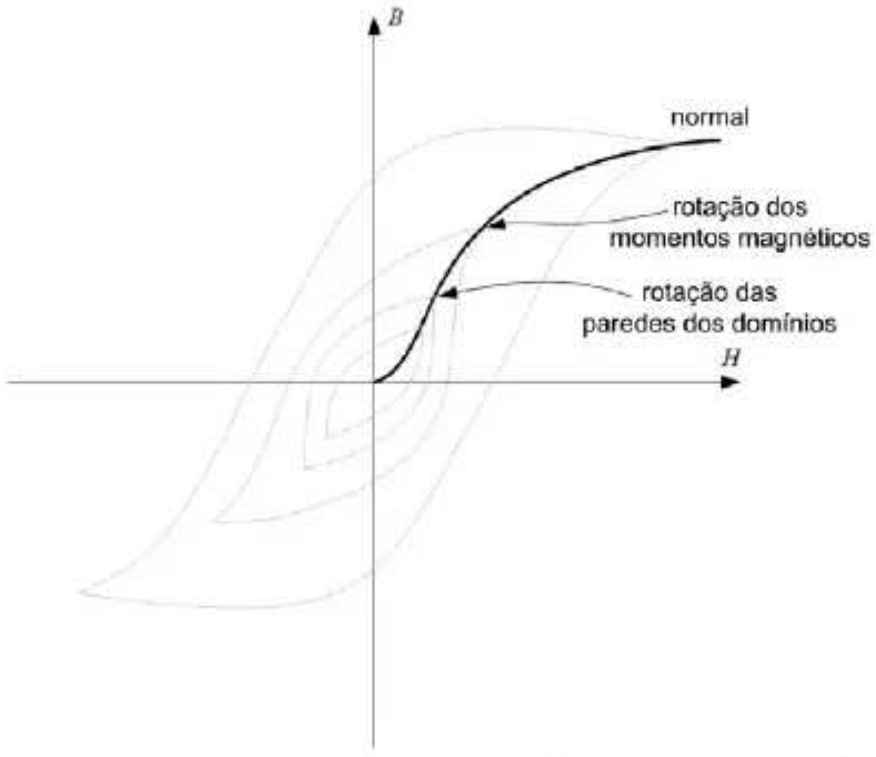


Figura 10 - Curva de magnetização normal / Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um gráfico de B em função de H, onde há a definição de uma curva de magnetização normal e as regiões de rotação das paredes dos domínios, rotação dos momentos magnéticos e região normal de magnetização.

Ao analisarmos a histerese em termos de $\frac{dM}{dH}$, podemos estabelecer a seguinte relação descrita no gráfico da Figura 10:

Região 1: onde os campos magnéticos têm pequena intensidade com altos valores de $\frac{dM}{dH}$, que se traduz como altos níveis de permeabilidade magnética.

Região 2: onde a relação $\frac{dM}{dH}$ apresenta valores menores, o que denominamos de **região de saturação**.

Conforme podemos observar na Figura 10, na região 1 há um grande número de domínios alinhados com o deslocamento das paredes dos domínios, já na região 2 ocorre a rotação dos momentos magnéticos, pois a maioria dos átomos já está polarizada dado ao ocorrido na região 1. Além disso, há uma região onde o valor de H é tal que $\frac{dM}{dH} = 0$, em que o material está saturado.

Dado aos ensaios de estímulo de corrente em indutores com diferentes materiais, é possível estudar o comportamento da curva normal de magnetização em que diferentes materiais apresentam características que podem ser associadas de acordo com sua classificação, sendo materiais magneticamente macios e

magneticamente duros. A Figura 11 mostra curvas características de histerese em materiais considerados magneticamente macios e magneticamente duros.

Na Figura 11, é possível observar materiais com área menor e, portanto, consistindo em laços de histerese estreitos. Eles possuem alta permeabilidade magnética e baixa coercitividade. Esses materiais são magneticamente macios, como os exemplos: materiais ferromagnéticos ferro-silício (Fe+Si) e Ferro Níquel (Fe+Ni), aplicados em baixas frequências, e os ferrites, para aplicações de alta frequência.

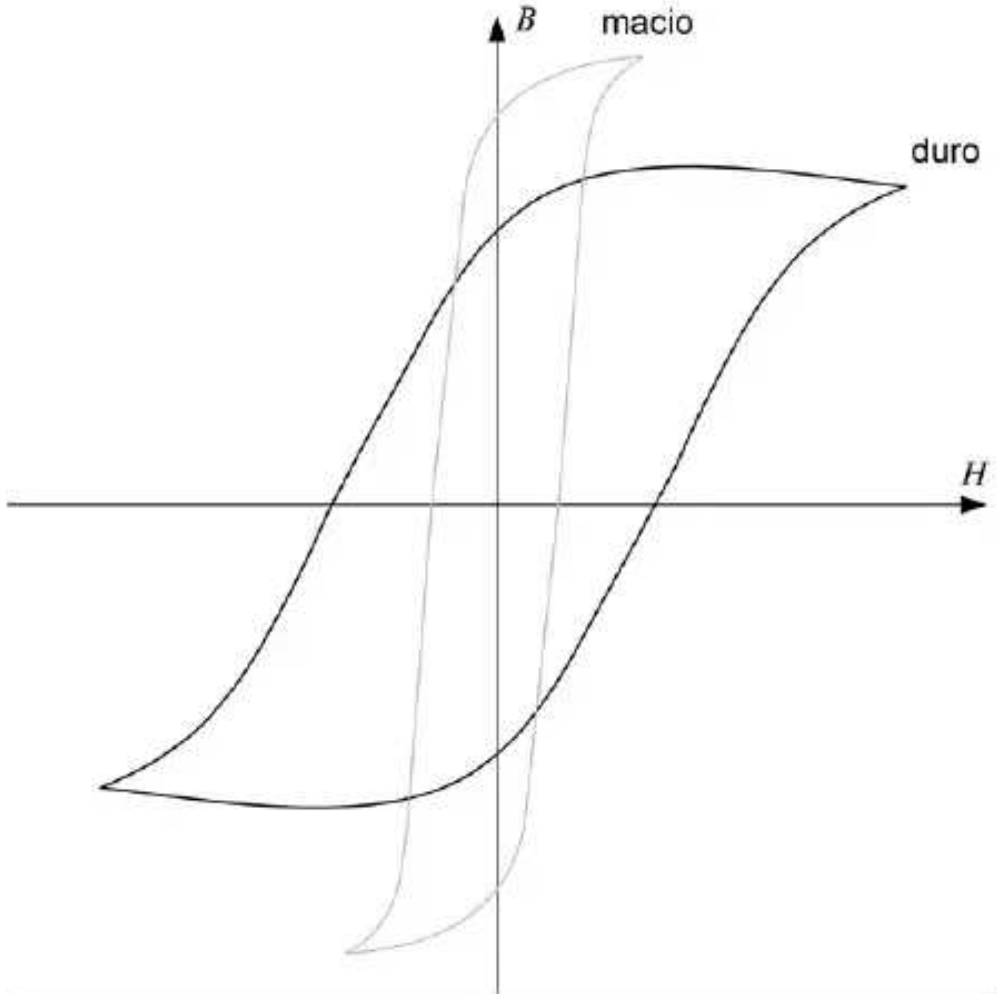


Figura 11 - Curvas típicas de histerese em materiais macios e duros
Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um gráfico de B em função de H, no qual há duas curvas inscritas de histerese, uma com área maior e outra com área menor. A figura de área maior é característica de materiais magneticamente duros e a curva com área menor é característica de materiais magneticamente macios.

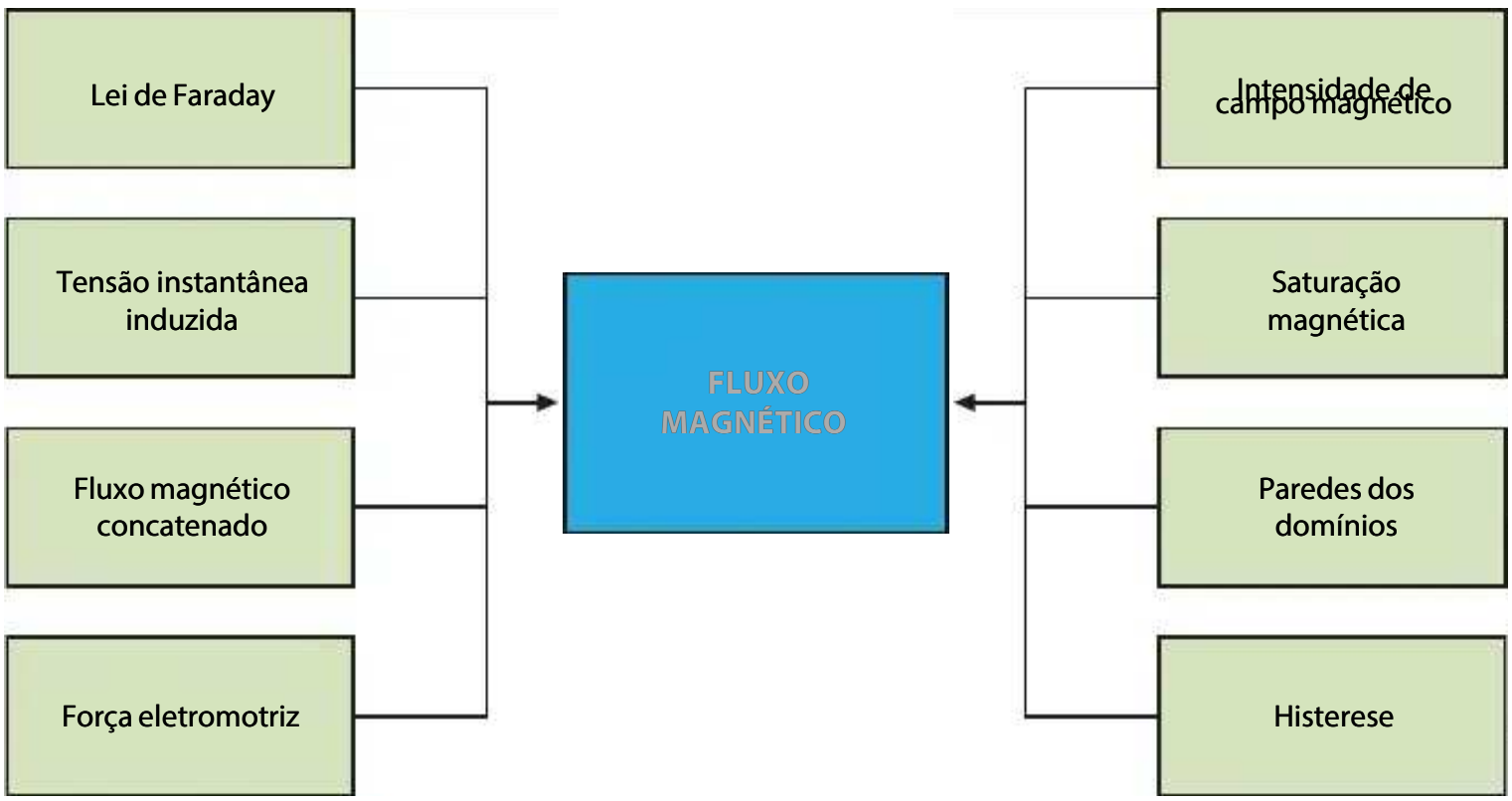
Os ferrites são materiais cerâmicos que são obtidos da mistura de óxidos de ferro com óxidos de outros elementos que podem ser metálicos ou não-metálicos, com alta resistividade elétrica e significativo magnetismo remanescente, como no caso do magnésio, manganês, cobalto, níquel, cobre, zinco e o bário (BIM, 2012).

Já os materiais duros apresentam laços largos de histerese, elevados valores de densidade de fluxo remanescente e coercividade, além de apresentarem baixa permeabilidade magnética ($\mu_r \approx \mu_0$). Essas características são úteis para a fabricação de ímãs permanentes.

O estudo da histerese e dos circuitos magnéticos permite ao estudante interpretar a escolha do melhor material a ser utilizado na construção de máquinas elétricas como transformadores e motores elétricos.

O conhecimento das relações entre as variáveis magnéticas e a dependência entre elementos magnéticos e elétricos é fundamental para o projeto de máquinas elétricas.

Aprendemos muitos termos importantes sobre circuitos magnéticos e agora vamos relembrar os principais conceitos a partir de um mapa conceitual:



Descrição da Imagem: esta figura apresenta um mapa conceitual com a palavra "Fluxo Magnético" localizada no centro e demais termos interligados: Lei de Faraday, tensão instantânea induzida, fluxo magnético concatenado, força eletromotriz, intensidade de campo magnético, saturação magnética, paredes dos domínios e Histerese.

A partir deste mapa conceitual, você deve construir o seu mapa conceitual com as definições de cada termo.

1. **Muitos dispositivos elétricos até hoje têm seu funcionamento baseado nas pesquisas realizadas por Michael Faraday e as mesmas leis impostas há mais de cem anos são válidas em pleno século XXI. Sobre a lei de Faraday, assinale a alternativa correta:**

   a) A lei de Faraday nos permite dizer que a tensão induzida (força eletromotriz – f.e.m.) é inversamente proporcional à variação do fluxo concatenado, pois $E^{med} = \frac{s}{\phi}.10^{-8}\ V$.

   b) A lei de Faraday nos permite dizer que a corrente induzida é inversamente proporcional à variação do fluxo relativo, pois $I_{med} = \frac{B}{\phi}.10^{-8}\ V$.

   c) A lei de Faraday nos permite dizer que a tensão induzida é diretamente proporcional à variação do campo magnético, pois $E_{med} = \frac{\overline{H}}{\phi}.10^{-8}\ V$.¨

   d) A lei de Faraday nos permite dizer que a tensão induzida (força eletromotriz – f.e.m.) é diretamente proporcional à variação do fluxo concatenado, pois $E_{med} = \frac{\phi}{t}.10^{-8}\ V$.

   e) A lei de Faraday nos permite dizer que a tensão induzida (força eletromotriz – f.e.m.) é diretamente proporcional à variação da relutância do material, pois $E_{med} = \frac{\mathbb{R}}{t}.10^{-8}\ V$.

2. **Os diferentes tipos de materiais possuem curvas de magnetização que permitem inferir sobre sua aplicabilidade em determinadas máquinas elétricas, como no caso de transformadores e motores elétricos. Sobre a classificação dos materiais como sendo magneticamente macios ou duros, podemos afirmar que:**

   a) Materiais magneticamente macios são aqueles que apresentam a curva de histerese estreita e têm como exemplo metais e não metais ferromagnéticos, para aplicação em baixas frequências, como exemplo do titânio e argônio.

   b) Materiais magneticamente duros são aqueles que atuam em altas frequências, a exemplo do ferrite que apresenta alta coercitividade magnética.

   c) Os materiais magneticamente duros são aqueles que apresentam laços largos de histerese, elevados valores de coercividade e baixa permeabilidade magnética.

   d) Os materiais magneticamente macios não apresentam permeabilidade relativa, portanto seu fluxo magnético é praticamente infinito e seus átomos estão sempre polarizados sem a necessidade de corrente elétrica para excitar sua saturação.

   e) Materiais magneticamente duros apresentam laços de histerese curtos e estreitos, com alta permeabilidade, altos fluxos magnéticos e baixa coercividade.

AGORA É COM VOCÊ

3. Durante a magnetização de um material, podemos observar a curva da histerese proporcional que cada material apresenta de acordo com suas propriedades naturais, composição química e temperatura. Sobre a curva de histerese de um determinado material, podemos afirmar que:

   a) Quando a corrente i atinge valor igual a zero, a densidade de fluxo magnético B **não é igual** a zero, o que confere o termo densidade de fluxo magnético remanescente "B_r".

   b) A corrente coercitiva é um valor de i que anula a relutância magnética.

   c) Há uma região onde o valor de H é tal que $\frac{dM}{dH} = 0$, em que o material está iniciando a magnetização e orientação dos seus domínios.

   d) As paredes magnéticas são rotacionadas juntamente com os momentos de dipolo magnético, fenômeno que ocorre após a saturação do material.

   e) A densidade de fluxo magnético é dada em função da intensidade de campo magnético e possui valores positivos e negativos, onde, ao aumentar e diminuir a corrente de magnetização, a intensidade BH é sempre a mesma em qualquer ponto, aumentando e retornando pelo mesmo caminho sem residuais conservativos.

AGORA É COM VOCÊ

5 Transformadores – conceitos fundamentais

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Nesta unidade, você terá a oportunidade de aprender sobre os transformadores e os princípios que definem seu funcionamento. Irá compreender as relações entre espiras, núcleo, limitações, topologias, aplicações. Por fim, poderá identificar as características que tornam este dispositivo tão versátil e útil ao funcionamento dos dispositivos elétricos e eletrônicos que movem o progresso de nossa sociedade contemporânea.

Quando você chega em casa do trabalho e abre o refrigerador, nota que os alimentos ali armazenados estão conservados e em temperatura adequada, o gelo está no freezer, pronto para ser servido naquela bebida refrescante. O interruptor da iluminação é acionado e a lâmpada acesa ilumina todo o ambiente. Agora é só ligar o chuveiro e tomar aquele banho revigorante.

Todos os dias, rotinas como essa se repetem em muitos lares pelo Brasil e pelo mundo, talvez com mais ou menos detalhes, mas com um ponto em comum: a tensão de trabalho dos eletrodomésticos. Certamente o refrigerador, a lâmpada e o chuveiro operam com tensões que normalmente são de 127 V ou 220 V, não mais do que isso, mas qual o valor da tensão da rede de distribuição em sua rua? Normalmente, em minha região é de 13,8 kV.

Você sabe como é possível carregar a bateria do smartphone, ligar o micro-ondas ou o aparelho de TV com essa tensão tão alta de 13,8 kV? Qual é o dispositivo capaz de adequar essa tensão para os níveis de nossos equipamentos e como **é** o seu funcionamento?

Para que possamos utilizar nossos dispositivos baseados em eletricidade, devemos obedecer aos padrões elétricos instituídos em nosso país, por este motivo temos regiões onde a tensão das tomadas é de 127 V e em outras é de 220 V, já em alguns países a tensão pode ser de 120 V, 230 V e até mesmo 240 V, como no caso de algumas regiões da Europa, logo, a tensão de alimentação dos dispositivos deve ser compatível com esses padrões.

Para entender mais sobre os padrões elétricos e a necessidade dos potenciais de distribuição, devemos fazer uma breve análise. Tomemos um chuveiro elétrico como exemplo. Um mesmo chuveiro elétrico de 7000 W de potência pode ser oferecido no mercado nos padrões 127 V ou 220 V, mas a potência é a mesma. O que isso quer dizer? Significa que a potência dele é a mesma, não importa o modelo (127 V/220 V) e o trabalho realizado será o mesmo em ambos os casos, com a mesma capacidade de aquecer a água.

O fato é que o modelo 220 V necessita de uma corrente de 31,81 A, já o modelo 127 V necessita de 55,11 A. Veja que a corrente é maior quando a tensão é menor para produzir o mesmo resultado (7000 W) e com isso o diâmetro dos condutores em 127 V é muito maior do que o utilizado em 220 V.

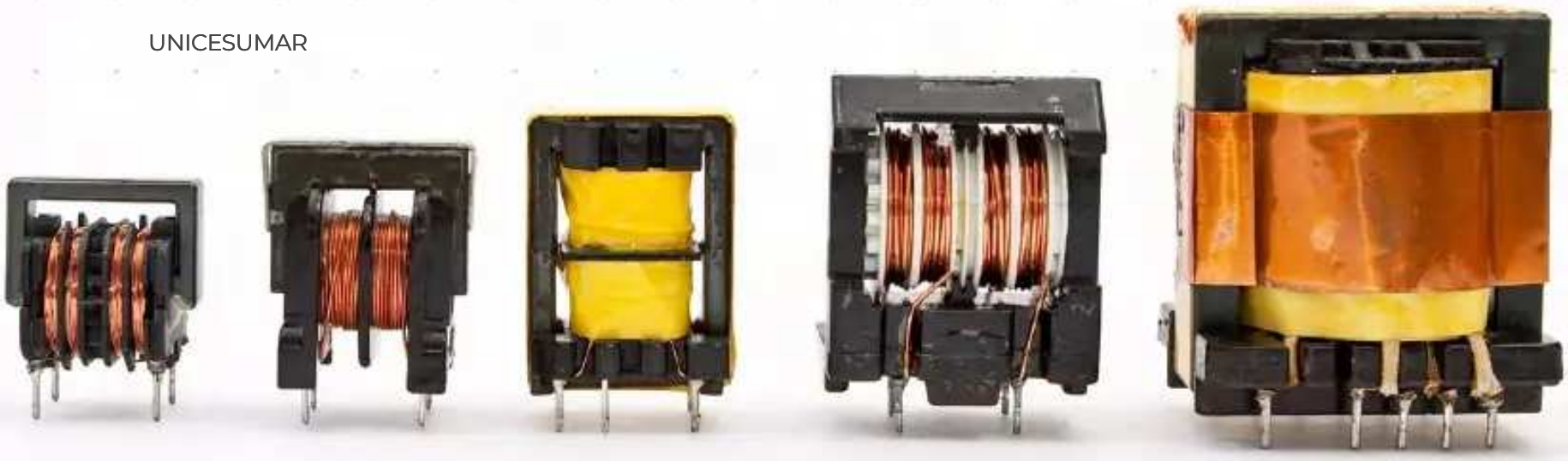
Imagine agora se a tensão do padrão elétrico de nossas tomadas fosse de 1200 V, então o mesmo chuveiro teria uma corrente de 5,83 A. Nesse caso, o condutor elétrico para a instalação deste chuveiro seria muito mais fino, porém teríamos um problema sério com a isolação, pois a tensão de 1200 V necessita de elementos isolantes muito mais preparados do que aqueles que temos nos eletrodomésticos, além do que os componentes elétricos e eletrônicos seriam muito maiores do que aqueles que utilizamos para garantir a segurança das pessoas e equipamentos, logo, a necessidade de assumir potenciais mais baixos dentro de nossas residências e empresas.

Uma prova disso é que, em nossas cidades, a rede de distribuição utiliza tensões mais elevadas para distribuir a energia elétrica aos consumidores. Essa medida é utilizada para que a potência do sistema seja suficiente em atender à demanda de utilização.

A potência é produto entre a tensão e a corrente elétrica, esta última que define a seção dos condutores, assim, correntes maiores exigem condutores com **áreas** de seção maiores, o que seria inviável se a tensão de distribuição fosse no mesmo potencial de nossas residências. Dessa forma, para garantir que possamos utilizar determinada potência em nossas casas e empresas, a tensão de distribuição se dá em valores elevados para permitir que a corrente possa ter valores menores e, assim, os condutores também terão suas seções menores, sendo então viáveis.

Entretanto, como a tensão de distribuição é muito alta para ser utilizada, precisamos adequá-la a potenciais entre 127 V e 220 V, por exemplo, e é este o propósito do transformador, que consiste em uma máquina elétrica capaz de converter a tensão de entrada em outra tensão de saída, podendo ser transformador elevador, rebaixador ou isolador, além do autotransformador, muito utilizado em regiões onde temos 220 V e precisamos de 127 V para ligar um dispositivo e vice-versa.

Há diversos tipos de transformadores, desde aqueles projetados para atuar no sistema de distribuição de energia (instalados em postes, cabines ou em subestações), como em circuitos eletrônicos de potência, em telecomunicações, em eletrodomésticos etc. Entre os casos citados, temos transformadores com diferentes tipos de núcleos, como, por exemplo: aço-silício, ferrite etc., e cada material e formato de núcleo tem um propósito adequado à sua aplicação, como valores de histerese, saturação, entre outros.



Neste momento, vamos realizar uma atividade que vai exercitar sua capacidade de analisar a possibilidade de execução de um transformador com determinado número de espiras e um certo núcleo que foi disponibilizado para este fim.

O núcleo de um transformador de seção quadrada possui uma janela por onde os condutores são alocados, portanto, essa área deve ser maior ou igual **à** soma da área de cada condutor enrolado. Veja a Figura 1, na qual é possível identificar as partes de um transformador monofásico.

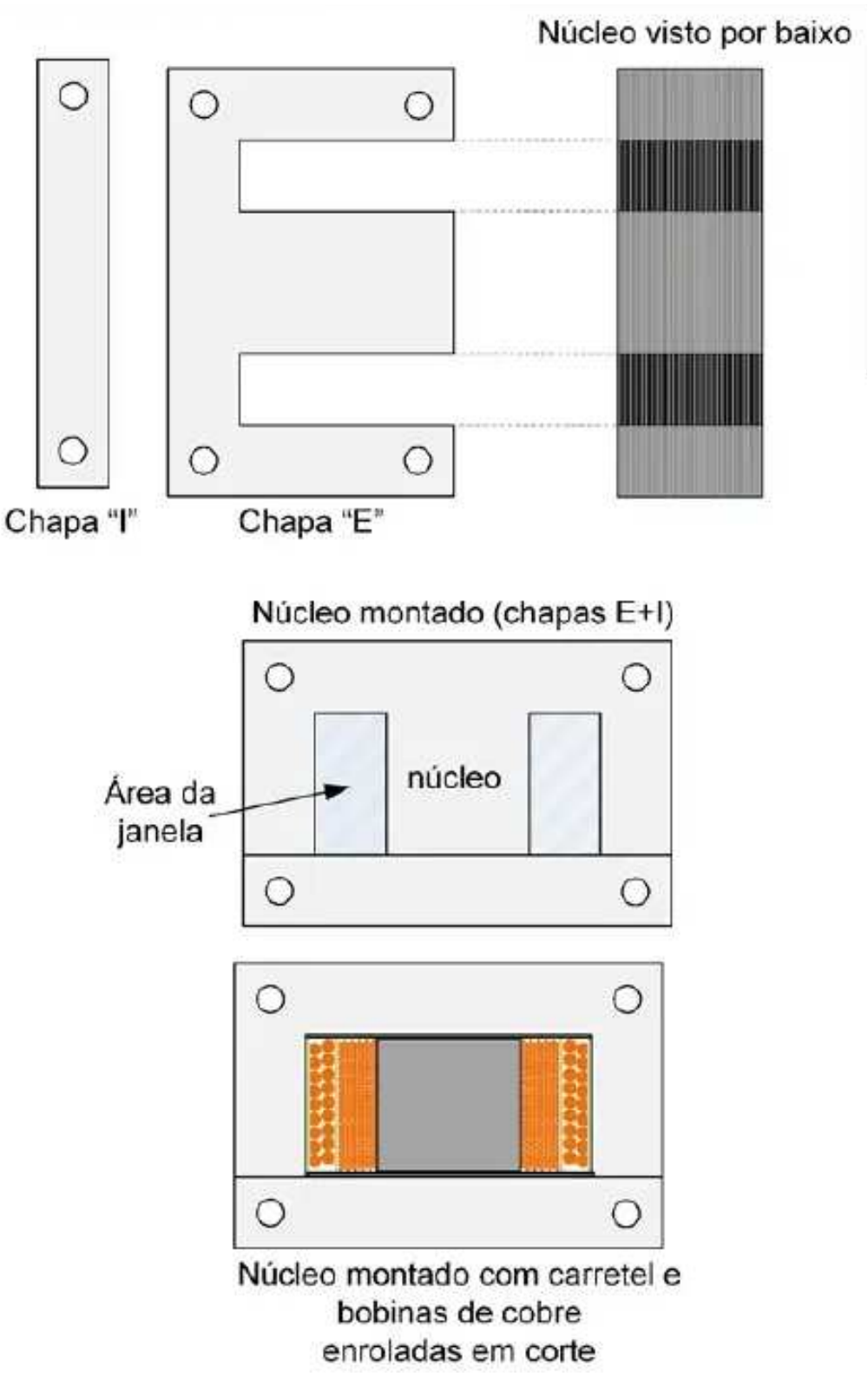


Figura 1 - Partes de um transformador
Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra um transformador monofásico e suas partes internas, com as chapas "E" e "I", o núcleo montado e os condutores enrolados com vista em corte onde é possível identificar o enrolamento primário (condutores mais finos) e o enrolamento secundário (condutores de diâmetro maior).

Considere que em um projeto de transformador monofásico foi adotado um núcleo de chapas cuja área da janela do transformador é retangular com lados que medem 2,0 cm x 6,0 cm, espaço que deve ser capaz de abrigar os enrolamentos de cobre, contendo um enrolamento primário e um enrolamento secundário, onde no primário serão utilizadas 1200 espiras de fio esmaltado nº 24 AWG, que, de acordo com a tabela AWG, equivale a 0,20 mm² e no secundário terá 120 espiras de fio 14 AWG, que equivale a 2,0 mm².

Desconsiderando-se a espessura da fita elétrica entre os enrolamentos primário e secundário e externamente ao enrolamento secundário, você consegue calcular e determinar se a área da janela deste transformador será suficiente para esta quantidade de fio enrolado? Ou seja, será possível executar a montagem deste transformador utilizando-se deste núcleo?

Ao projetar um transformador, deve ser levado em consideração perdas que existem na transferência de energia do enrolamento primário para o enrolamento secundário e que têm relação direta com a capacidade que o núcleo tem de conduzir fluxo magnético, dos condutores em conduzir corrente elétrica, entre outros fatores que estão inerentes ao funcionamento desta incrível máquina elétrica estática.

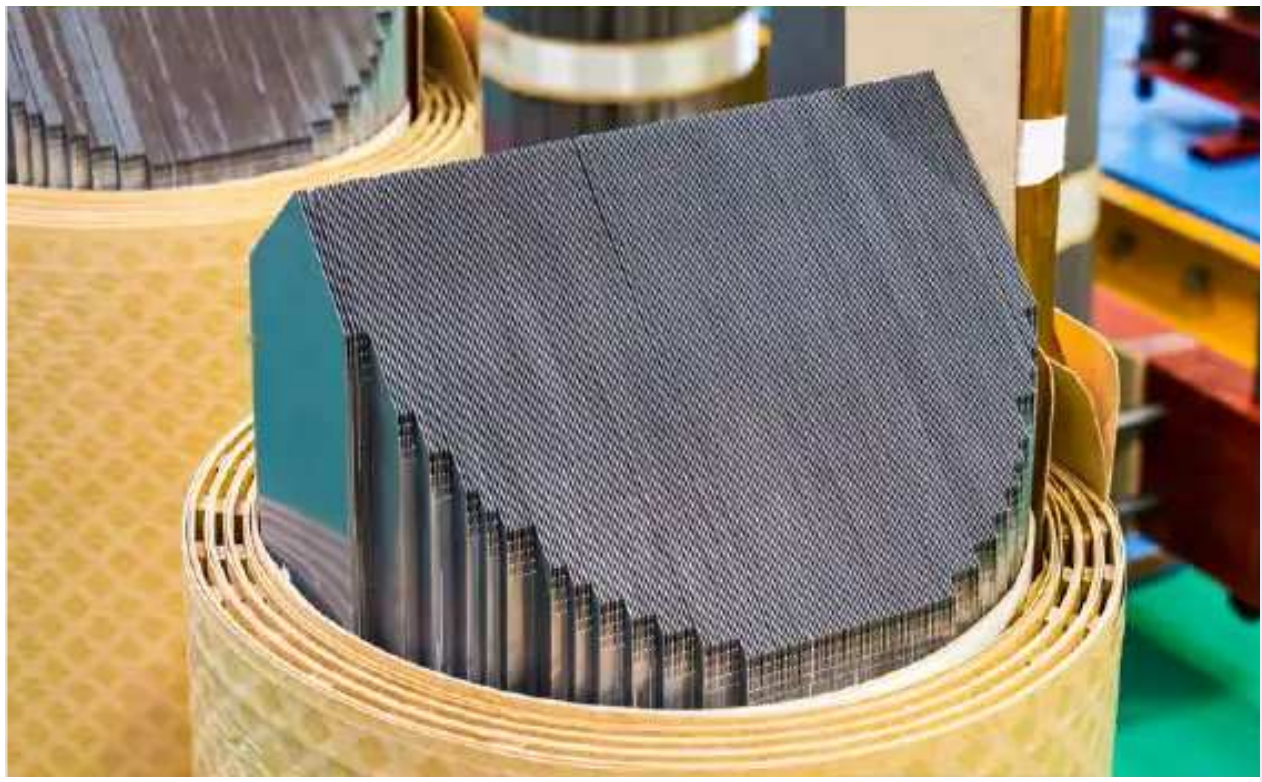
A potência de um transformador leva em consideração a potência de cada enrolamento de um mesmo lado, sendo um dos lados o enrolamento primário e outro secundário, o que implica diretamente sobre o diâmetro dos condutores.

Os condutores de cobre utilizados para a fabricação dos transformadores são isolados por uma fina camada de esmalte, daí seu nome "fio esmaltado". Eles apresentam áreas de seção transversal que dependem da especificação dada pela escala americana de bitolas de fios (*American Wire Gauge*) ou simplesmente "AWG". Essa tabela possui equivalência com o sistema utilizado no Brasil, assim, um fio esmaltado nº 20 AWG equivale a 0,51 mm².

As chapas de aço-silício que compõe o núcleo dos transformadores são comercializadas em tamanhos padronizados e possuem dimensões específicas. Dado que há uma janela a ser considerada para a alocação dos enrolamentos, como é possível aumentar a capacidade de potência de um transformador sem aumentar as dimensões físicas do núcleo de chapas?

DIÁRIO DE BORDO

Os transformadores foram mencionados em nosso estudo logo no início deste livro de maneira introdutória, porém, nesta unidade, iremos abordar o princípio de funcionamento desta formidável máquina elétrica que contribui para diferentes segmentos e viabiliza estrategicamente o sistema de distribuição de energia elétrica que conhecemos em todo o mundo.



A partir das descobertas realizadas por Faraday (1831), em 1882 outros pesquisadores, os engenheiros Max Deri, Otto Blathy e Carl Zipernowsky, apresentaram um sistema comercial de energia em corrente alternada, onde 1067 lâmpadas eram acionadas em paralelo com uma tensão de 60 V e 100 Hz , mantido por um gerador monofásico em corrente alternada que era então acionado por uma máquina a vapor (BIM, 2012).

Desde então, as pesquisas no setor de energia elétrica só avançaram e em meados de 1960 é que o desenvolvimento pleno de dispositivos de estado sólido resultou em inovações significativas, em que um potencial alternado poderia então ser retificado para atender a demandas de corrente contínua, que na verdade passou a ser uma opção mais econômica na transmissão de energia elétrica, pois neste caso utilizaria apenas dois cabos e ao chegar na cidade de destino é então convertida em tensão alternada para alimentar os circuitos elétricos dos dispositivos que utilizamos em casa e na indústria.

Conceitualmente falando, o transformador monofásico é um dispositivo capaz de converter determinada amplitude de tensão em outra, podendo ser maior, menor ou igual ao valor da tensão de entrada. Normalmente, um transformador possui pelo menos um enrolamento primário (o qual conecta-se à rede elétrica) e um enrolamento secundário (o qual conecta-se à carga), podendo também possuir vários enrolamentos secundários, desde que respeitando-se os limites físicos do núcleo magnético. O núcleo dos transformadores normalmente é fabricado em aço-silício, para aplicações em baixa frequência, e em ferrite, para aplicações de alta frequência, comum em conversores estáticos de eletrônica de potência.

Um transformador converte a tensão aplicada em seu primário para outra tensão em seu secundário de modo que sua classificação se dá de acordo com as relações:

- **Transformador elevador**: quando a tensão do secundário é maior do que a tensão do primário;
- **Transformador rebaixador**: quando a tensão do secundário é menor do que a tensão do primário;
- **Transformador isolador**: quando a tensão do secundário é igual à tensão do primário; e
- **Autotransformador**: quando os enrolamentos primário e secundário são interligados.

Neste livro, iremos convencionar a seguinte nomenclatura para as variáveis:

Φ : fluxo magnético canalizado no núcleo do transformador;

Φ_{d1} : fluxo magnético disperso no enrolamento primário do transformador;

Φ_{d2} : fluxo magnético disperso no enrolamento secundário do transformador;

N_1 : enrolamento primário;

N_2 : enrolamento secundário;

$v_p(t)$: tensão no enrolamento primário do transformador;

$i_p(t)$: corrente no enrolamento primário do transformador;

$v_s(t)$: tensão no enrolamento secundário do transformador;

$i_s(t)$: corrente no enrolamento secundário do transformador;

$P_p(t)$: potência no enrolamento primário do transformador;

$P_s(t)$: potência no enrolamento secundário do transformador;

Z_2 : impedância da carga;

R_L : resistência da carga.

Também devemos adotar a padronização para a simbologia de transformadores, que segue conforme dado na Figura 2:

Na Figura 2 (a), é possível observar que um símbolo "•" é utilizado para identificar o sentido de enrolamento da bobina, assim, quando os pontos "•" estiverem alinhados, significa que os enrolamentos foram enrolados no mesmo sentido no núcleo. Caso haja inversão no sentido do enrolamento, o símbolo é inserido na parte oposta do desenho, conforme dado na Figura 2 (b).

O procedimento de inversão do sentido do enrolamento secundário com relação ao enrolamento primário consiste em promover oposição de fase, logo, no caso dado pela Figura 2 (a), a fase da tensão do enrolamento secundário está alinhada com a fase da tensão do enrolamento primário, dado que o indicador de sentido de enrolamento está posicionado no mesmo alinhamento entre os enrolamentos. Já na Figura 2 (b), a fase da tensão do enrolamento secundário está em oposição à fase do enrolamento primário, visto que o ponto de indicação do sentido de enrolamento é oposto ao dado no enrolamento primário.

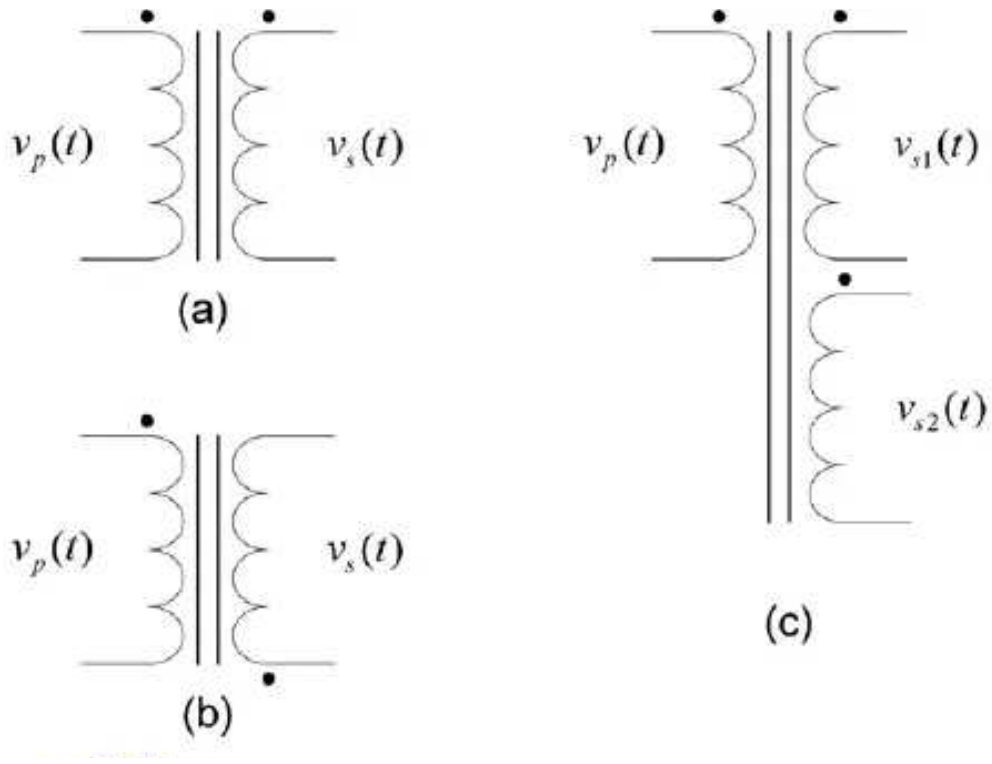


Figura 2 - Simbologia para transformadores: (a) enrolamentos alinhados, (b) enrolamentos invertidos e (c) mais de um enrolamento secundário / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra três símbolos para transformador monofásico, na qual o primeiro é de um transformador com um enrolamento primário e um enrolamento secundário enrolados em fase, o segundo é de um transformador com um enrolamento primário e um enrolamento secundário enrolados em fase invertida de 180°, enquanto o terceiro é de um transformador com um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários.

O efeito do alinhamento de fases não é significativo neste estudo para transformadores monofásicos, haja vista que não teremos associação entre as bobinas e com isso não será necessário analisar o ângulo entre as fases, porém, para transformadores trifásicos (assunto abordado em máquinas polifásicas) se faz fundamental.

A ideia sobre o projeto de transformadores abordado por este livro remete aos transformadores com núcleo sólido (há transformadores com núcleo de ar, que não serão abordados aqui). Para o caso de núcleos sólidos, é desejado que o núcleo do transformador seja o mais denso possível, para evitar os efeitos de perdas na transferência de potência entre os enrolamentos.

Os transformadores monofásicos estudados por esta unidade apresentam uma estrutura baseada em núcleo de chapas de aço-silício, que são fornecidas em formatos padronizados que normalmente apresentam formas semelhantes às letras maiúsculas "E" e "I", conforme podemos ver na Figura 3.

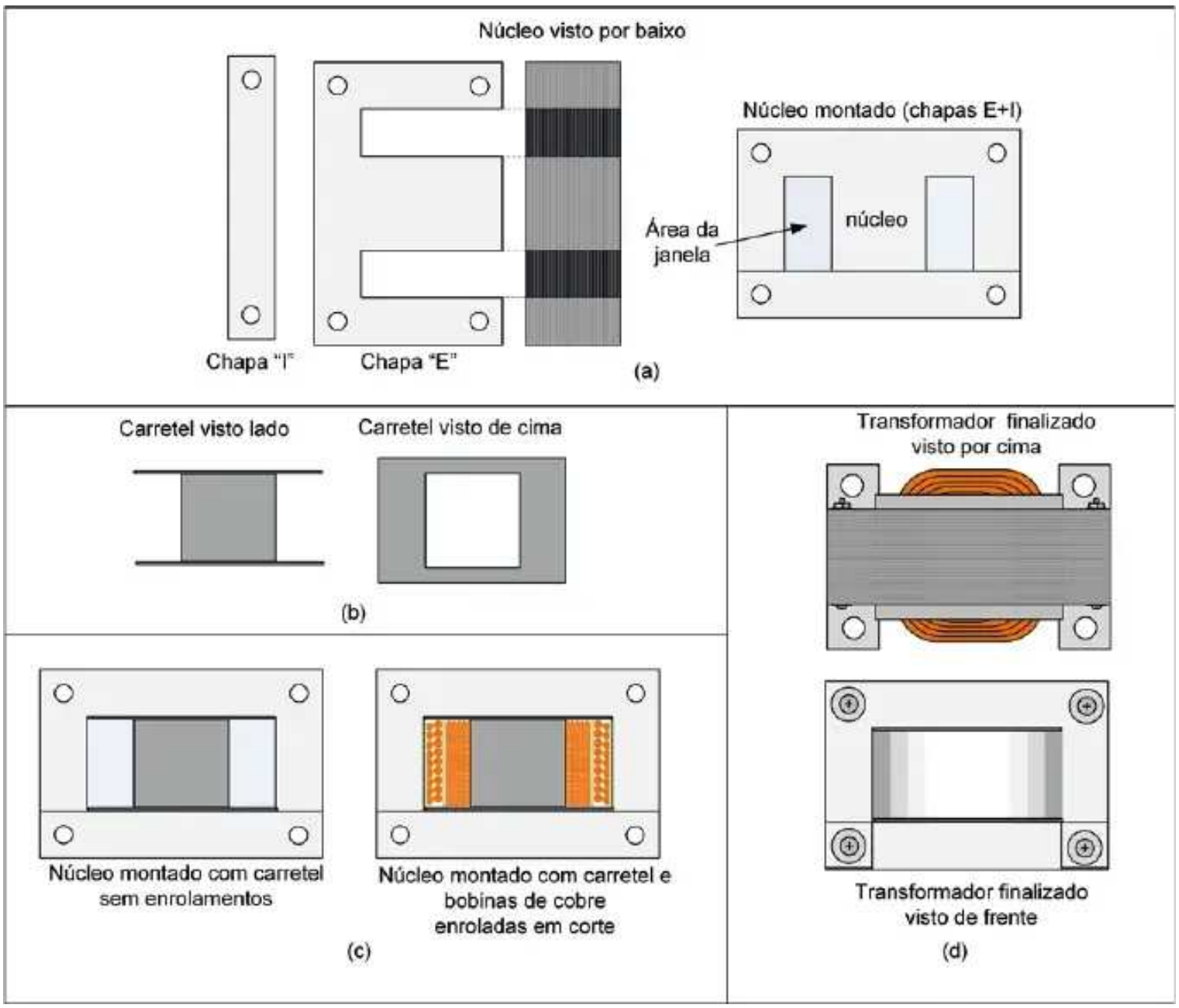


Figura 3 - Transformador monofásico: detalhes mecânicos / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura apresenta os detalhes mecânicos de um transformador monofásico e suas partes, dividido em etapas de (a) até (d). Em (a), é possível observar as chapas do transformador e seu agrupamento formando um núcleo sólido, em (b) há a representação do carretel onde os fios de cobre são enrolados, em (c) podemos ver as chapas montadas com o carretel vazio (sem condutores de cobre) e com o carretel carregado (com o enrolamento de fio esmaltado em corte), já em (d) a figura mostra o transformador montado e finalizado.

Perceba, ao analisar a Figura 3, como **é possível ver** os detalhes mecânicos do transformador monofásico, além de suas partes mecânicas, por meio de uma figura que se divide nos estágios de (a) até (d).

Em (a), é possível observar as chapas que constituem o núcleo do transformador e seu agrupamento, formando um núcleo sólido.

Na Figura 3 (b), podemos observar a representação do carretel plástico do transformador, que é disponibilizado em tamanhos padronizados para a execução dos transformadores em geral. Este componente tem o objetivo de alojar os enrolamentos das bobinas de maneira organizada, tendo aqueles com divisões para enrolamentos primário e secundário. Para o caso dos transformadores de grande porte, o carretel normalmente é fabricado de acordo com a necessidade.

Em (c), podemos ver as chapas montadas com o carretel vazio (sem condutores de cobre) e com o carretel carregado (com o enrolamento de fio esmaltado em corte), já em (d) a figura mostra o transformador montado e finalizado com a adição de fita elétrica protetora.

Vamos realizar o estudo do **transformador funcionando a vazio** para entender suas limitações e características deste modo de operação, para isso, vamos analisar a Figura 4:

Olá, estudante, você sabe como um transformador é construído e quais as regras de projeto para iniciar a montagem de um bom transformador? Se deseja saber como este processo ocorre, convido você a ouvir este podcast onde irei falar sobre os transformadores e suas características construtivas.

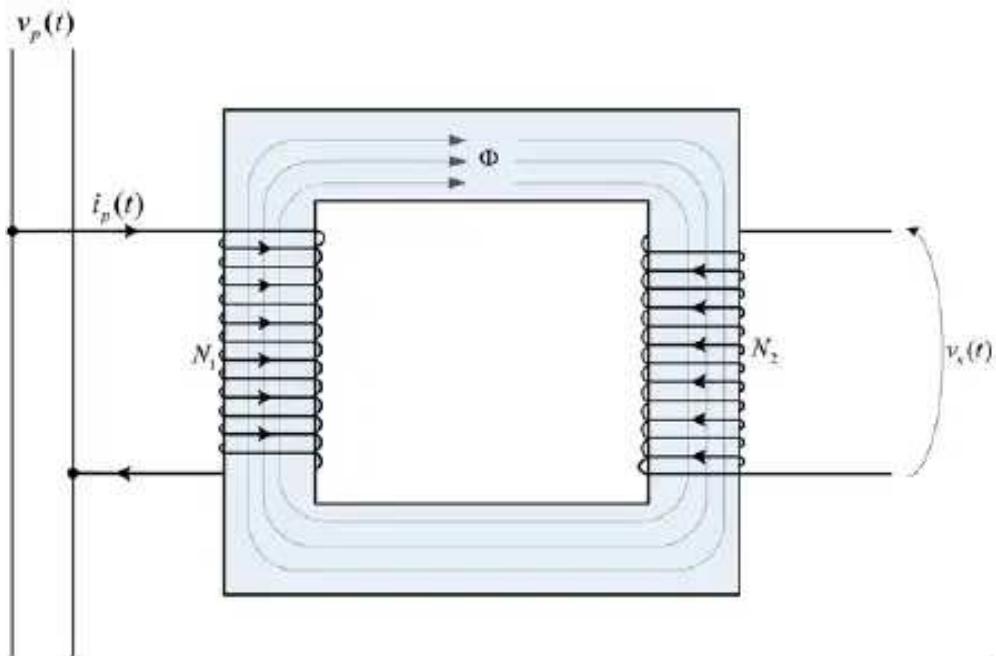


Figura 4 - Transformador a vazio / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação de um transformador monofásico com seu enrolamento primário conectado à rede elétrica e com secundário a vazio. Também é mostrado o fluxo magnético e suas linhas fluindo por meio do núcleo e os enrolamentos N1 e N2, primário e secundário, respectivamente.

Como podemos observar, o enrolamento primário está conectado à rede com tensão alternada $v_p(t)$, a qual produz corrente $i_p(t)$ que flui por meio dos condutores de N_1. Em consequência disso, surge o fluxo magnético alternado Φ que possui mesma fase da corrente $i_p(t)$. Como no caso da Figura 4 o transformador está com seu enrolamento secundário a vazio (sem carga acoplada), o enrolamento primário é visto como uma carga puramente indutiva, com isso, a corrente $i_p(t)$ é defasada em atraso de $90°$ com relação à tensão $v_p(t)$.

Para cada espira de fio enrolado no núcleo do transformador que conduz o fluxo Φ, temos a indução da diferença de potencial (d.d.p.) "E_n" dada por:

$$E_n = 10^{-8}.\omega.\Phi.N_x$$

Equação 1

Em que "E_n" é a tensão no enrolamento "$_n$", podendo ser primário (E_p) ou secundário (E_s), com a pulsação do sinal de tensão $\omega = 2.\pi.f$, onde f é a frequência em "Hz" e N_x o número de espiras do enrolamento "$_x$".

Assim, para os enrolamentos N_1 e N_2 a máxima f.e.m. gerada é dada pela Equação 2 e Equação 3, respectivamente:

$$E_1 = 10^{-8}.\omega.\Phi.N_1$$

Equação 2

$$E_2 = 10^{-8}.\omega.\Phi.N_2$$

Equação 3

A f.e.m. gerada no enrolamento N_1 apresenta defasagem de $90°$ com relação ao fluxo Φ que a produz, assim como a f.e.m. gerada no enrolamento N_2; assim, podemos afirmar que E_p está em fase com E_s de acordo com o gráfico da Figura 5:

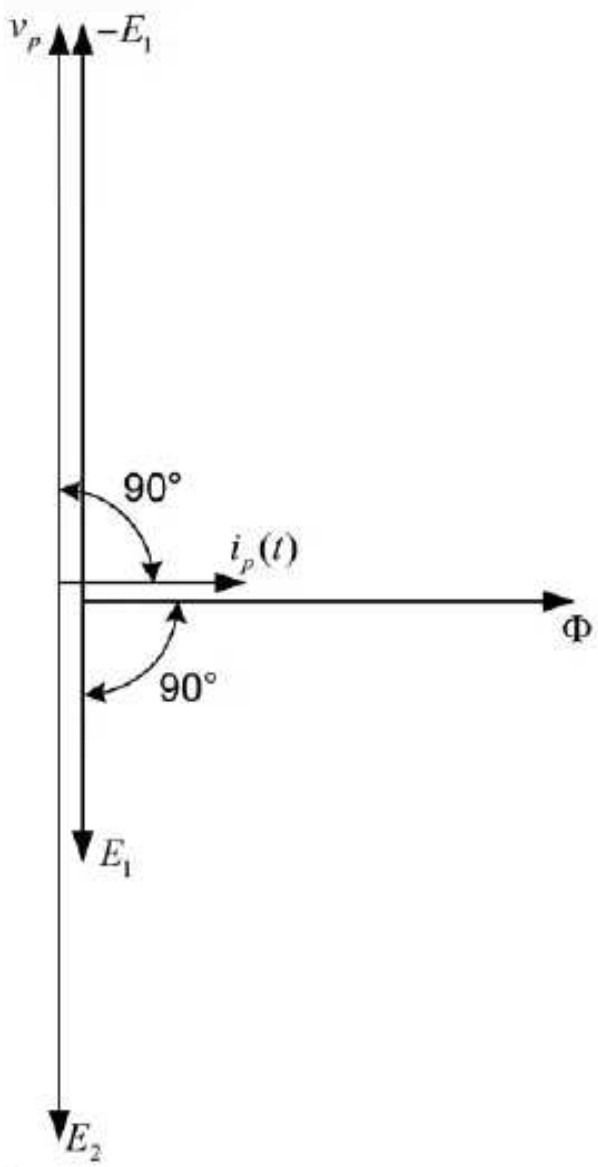


Figura 5 - Diagrama de fases das f.e.m. em cada enrolamento do transformador
Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta gráficos das fases entre as f.e.m. E1 e E2, induzidas pelo fluxo Φ sua relação com a tensão aplicada no enrolamento primário do transformador (vP).

A relação entre as tensões E_p e E_s é dada por (MARTIGNONI, 1971):

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Equação 4

Observe a partir da Equação 4 que há uma relação direta entre as f.e.m. e o número de espiras dos enrolamentos.

É importante ressaltar que as f.e.m. E_p e E_s induzidas estão em oposição de fase com a tensão geradora v_p, portanto, v_p reage sobre E_p como uma força contra-eletromotriz (f.c.e.m.).
Fonte: adaptado de Martignoni (1971).

Tendo considerado o transformador a vazio, considerando-se a resistência ôhmica do enrolamento primário e dispersões magnéticas como nulas, podemos considerar a seguinte relação:

$$E_p = \sim v_p$$

Equação 5

Desta forma, o fluxo Φ máximo é obtido quando:

$$\Phi = 10^{-8}.\frac{E_P}{4,44.f.N_1}$$

Equação 6

Um ponto importante a ressaltar a respeito da Equação 6 é que, se fixada a tensão de entrada v_p, o fluxo Φ é totalmente independente da forma e da relutância ($\Re$) do sistema, que terá função apenas para calcular a corrente magnetizante $i_p(t)$ para produzir o fluxo (MARTIGNONI, 1971). Assim, para determinar a corrente magnetizante $i_p(t)$ devemos utilizar a relação:

$$N_1.i_p(t) = \Phi.\Re$$

Equação 7

Logo, em função de $i_p(t)$, fica:

$$i_p(t) = \frac{\Phi.\Re}{N_1}$$

Equação 8

Podemos concluir que, para a operação a vazio de um transformador, o menor valor da corrente de magnetização ($i_p(t)$) é obtido quando temos o menor valor de relutância " $\Re$ ".

A relutância " $\Re$ " é o quociente entre a força magnetomotriz e o fluxo magnético. Assemelha-se à resistência elétrica em um circuito elétrico.

Contudo, podemos afirmar que, para operação a vazio (com circuito aberto), a relação entre as tensões de entrada e saída em um transformador, o número de espiras e as respectivas f.e.m. podem se relacionar de acordo com a expressão (KOSOW, 2005):

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Equação 9

O transformador é projetado para atender a uma demanda de carga conectada em seu enrolamento secundário e, para isso, deve ter seu enrolamento primário conectado à rede elétrica, logo, analisaremos agora o "**transformador funcionando com carga**". O fluxo magnético se propaga pelo núcleo do transformador e também pela sua periferia conforme podemos visualizar na representação dada pela Figura 6:

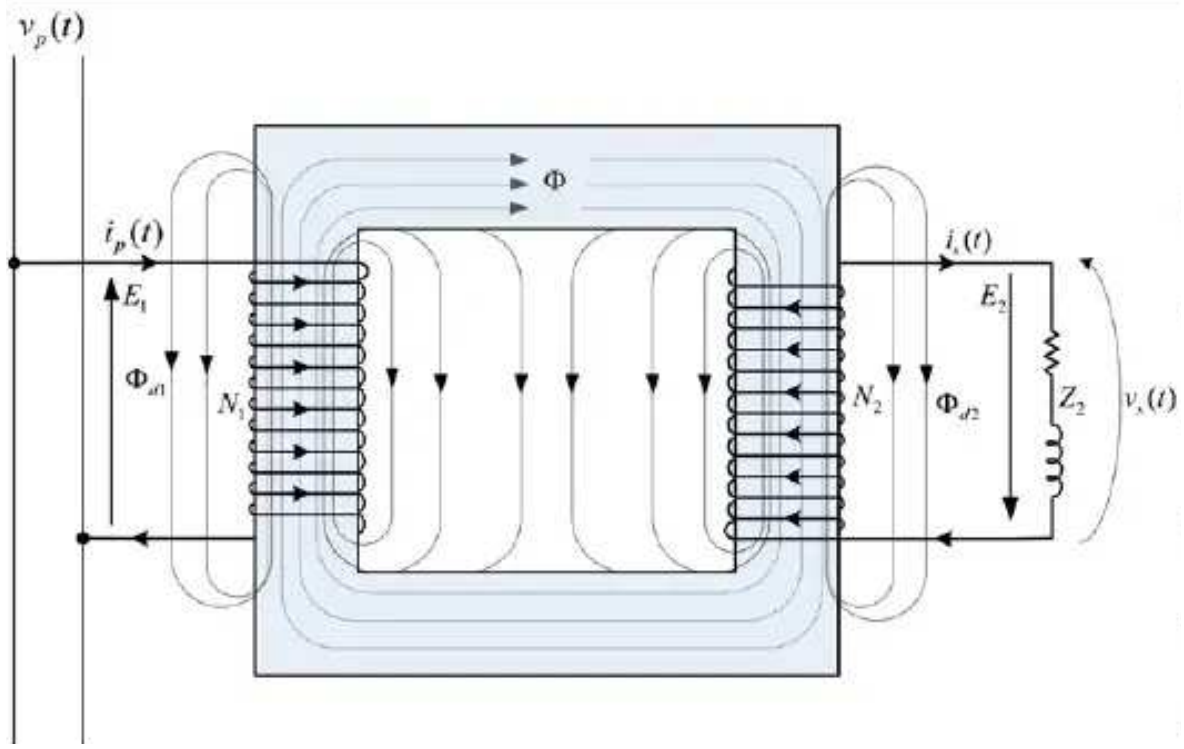


Figura 6 - Transformador operando com carga acoplada ao enrolamento secundário / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação das linhas de fluxo magnético através do núcleo do transformador e nas periferias deste com as indicações da tensão de alimentação do primário e da carga no secundário, além da tensão induzida no secundário.

Ao analisar a Figura 6, podemos observar um transformador com tensão "$v_p(t)$" aplicada em seu enrolamento primário (entrada) e com carga "Z_2" acoplada ao enrolamento secundário (saída).

A tensão da rede elétrica aplicada ao enrolamento primário (N_1) do transformador tem como resultado o surgimento da corrente "$i_p(t)$" e, consequentemente, o fluxo "Φ", além do fluxo magnético disperso "Φ_{d1}".

O fluxo "Φ" se propaga por meio do núcleo e produz como consequência disso uma tensão induzida no enrolamento secundário (N_2), que alimenta uma carga adotada como impedância de saída "Z_2".

A indução de tensão "$v_s(t)$" no enrolamento secundário conectado à carga (Z_2) produz como resultado a corrente "$i_s(t)$" e, por conseguinte, o fluxo magnético disperso "Φ_{d2}".

Indico o livro ***Máquinas Elétricas e Acionamento*** para você, estudante, avançar nos estudos de conversão eletromecânica de energia. Com ele, você irá saber mais sobre máquinas elétricas e suas características em nível de excelência.

A partir do circuito dado na Figura 6, ainda é importante ressaltar que a f.e.m. E_2 impulsiona a corrente $i_s(t)$ que **é defasada em relação** a esta f.e.m. geradora, com ângulo φ_2. Esta corrente produz força magnetomotriz que pode ser expressa como: $N_2 i_s(t)$, em fase com I_2, tendendo então a alterar o fluxo produzido pela força magnetomotriz geradora, dada pela relação do enrolamento primário $N_1 i_p(t)$.

Como efeito, observamos uma alteração entre as f.e.m. dos dois enrolamentos que consequentemente produzam um desequilíbrio na relação entre E_1 e $v_p(t)$.

Automaticamente, o enrolamento primário irá assumir uma nova corrente mais elevada, para equilibrar a diferença entre E_1 e $v_p(t)$. Esta corrente estabilizadora é denominada de $i_p^{'}(t)$ definida como $N_1 i_p^{'}(t)$, com objetivo de estabilizar a f.m.m. (força magnetomotriz) $N_2 i_s(t)$.

Podemos entender que, ao iniciar uma corrente pelo enrolamento secundário do transformador, surge uma corrente adicional à corrente $i_p(t)$, outra $i_p^{'}(t)$ orientada a equilibrar a f.m.m. do enrolamento secundário.

Podemos analisar por meio do diagrama fasorial dado pela Figura 7, onde estão representados os vetores $N_2 i_2(t)$, estão em contraposição ao vetor $N_1 i_p^{'}(t)$.

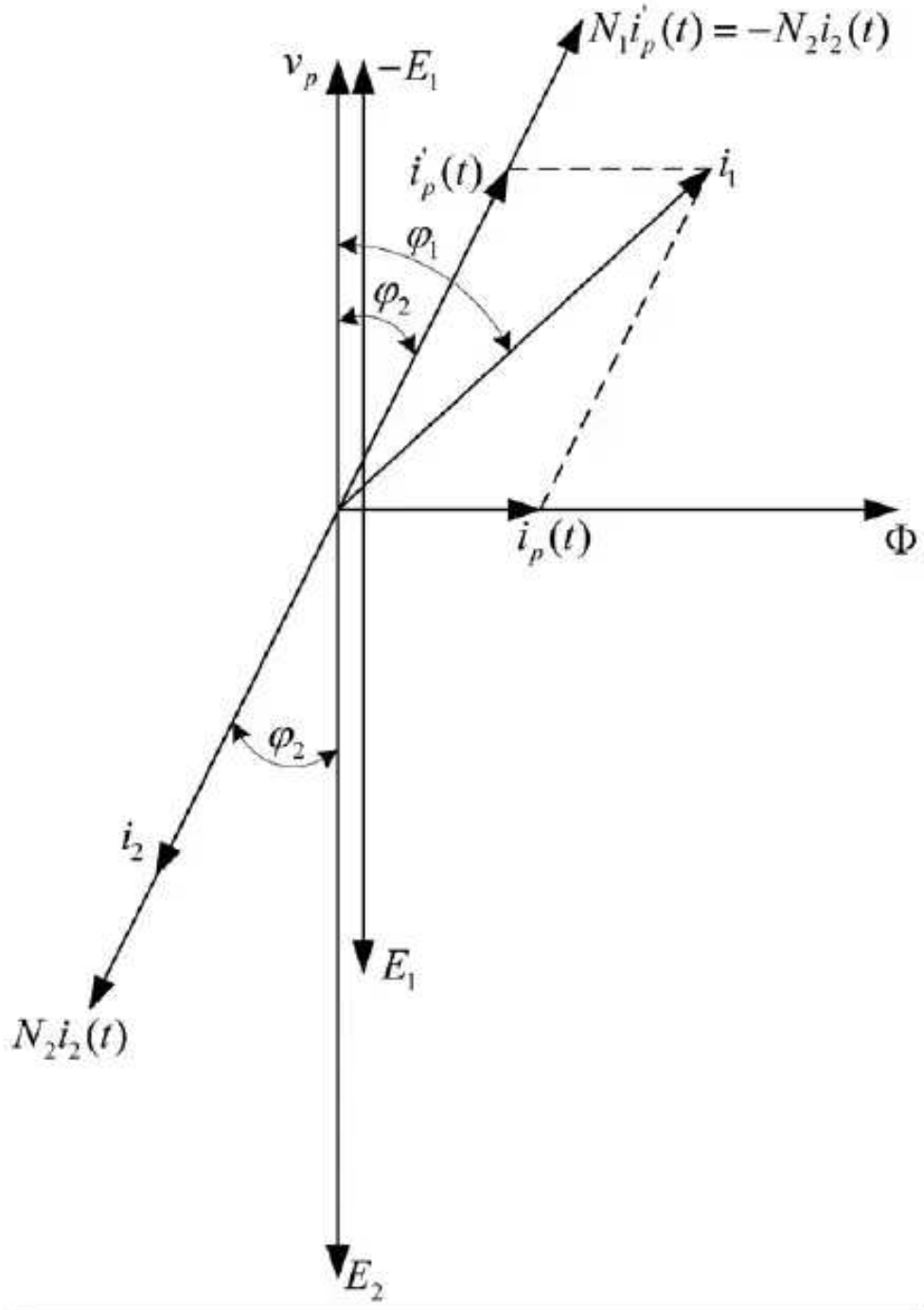


Figura 7 - Diagrama vetorial - transformador: operação com carga
Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um diagrama fasorial de um transformador operando com carga, onde a relação $N_1 i_p^{'}(t)$ é adicional à relação que utiliza apenas a corrente de magnetização $i_p(t)$, adicional ao que esta relação é contraposta pela relação $N_2 i_2(t)$, uma vez que a corrente $i_p^{'}(t)$ é produzida para equilibrar a relação de f.m.m. desestabilizada pela corrente no secundário.

Observa-se que, ao surgir $i_p^{'}(t)$ adicional à $i_p(t)$, o fluxo Φ é então reestabelecido e com isso o equilíbrio da tensão $v_p(t)$ e E_1 é retomado, assim, podemos concluir que "o regime de funcionamento de um transformador é determinado pela necessidade de f.e.m." (MARTIGNONI, 1971, p. 7).

Quando um transformador com carga fornece uma corrente $i_s(t)$ em seu secundário, o enrolamento primário absorve da rede elétrica à qual está conectado a corrente total i_1, que é a resultante magnetizante $i_p(t)$ e da corrente de reação $i_p^{'}(t)$, esta última que depende de:

$$i_p^{'}(t) = -i_s(t)\frac{N_2}{N_1}$$

Equação 10

A corrente $i_p^{'}(t)$ é defasada da tensão $v_p(t) = -E_1$ em ângulo φ_1, diretamente associado ao ângulo de defasagem φ_2 oriundo da corrente no enrolamento secundário. Desta forma, ao se variar a corrente no enrolamento secundário do transformador, o fluxo Φ é inalterado, sofrendo variações apenas $i_p^{'}(t)$, juntamente com $i_s(t)$.

Assim, podemos afirmar que:

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} =\sim \frac{N_2}{N_1}$$

Equação 11

Em que:

$$i_p(t) =\sim \frac{N_2}{N_1} i_s(t)$$

Equação 12

Ao nos referirmos à construção do transformador, devemos levar em consideração algumas topologias que se referem ao formato dos enrolamentos, conforme podemos observar a partir da Figura 8 que temos basicamente dois formatos de núcleo: **envolvente** e **envolvido**.

O transformador de **núcleo envolvido** é aquele que utiliza um núcleo e cada enrolamento é formado de um lado deste, de modo que o fluxo magnético flua em um só agrupamento canalizado para o outro por meio do material do núcleo. Podemos observar este exemplo na Figura 8 (a).

Já o transformador de **núcleo envolvente** é aquele que possui os enrolamentos ao centro da peça que divide ao meio o fluxo para as laterais, de modo a distribuir suas linhas uniformemente para cada enrolamento. O exemplo deste núcleo é dado na Figura 8 (b).

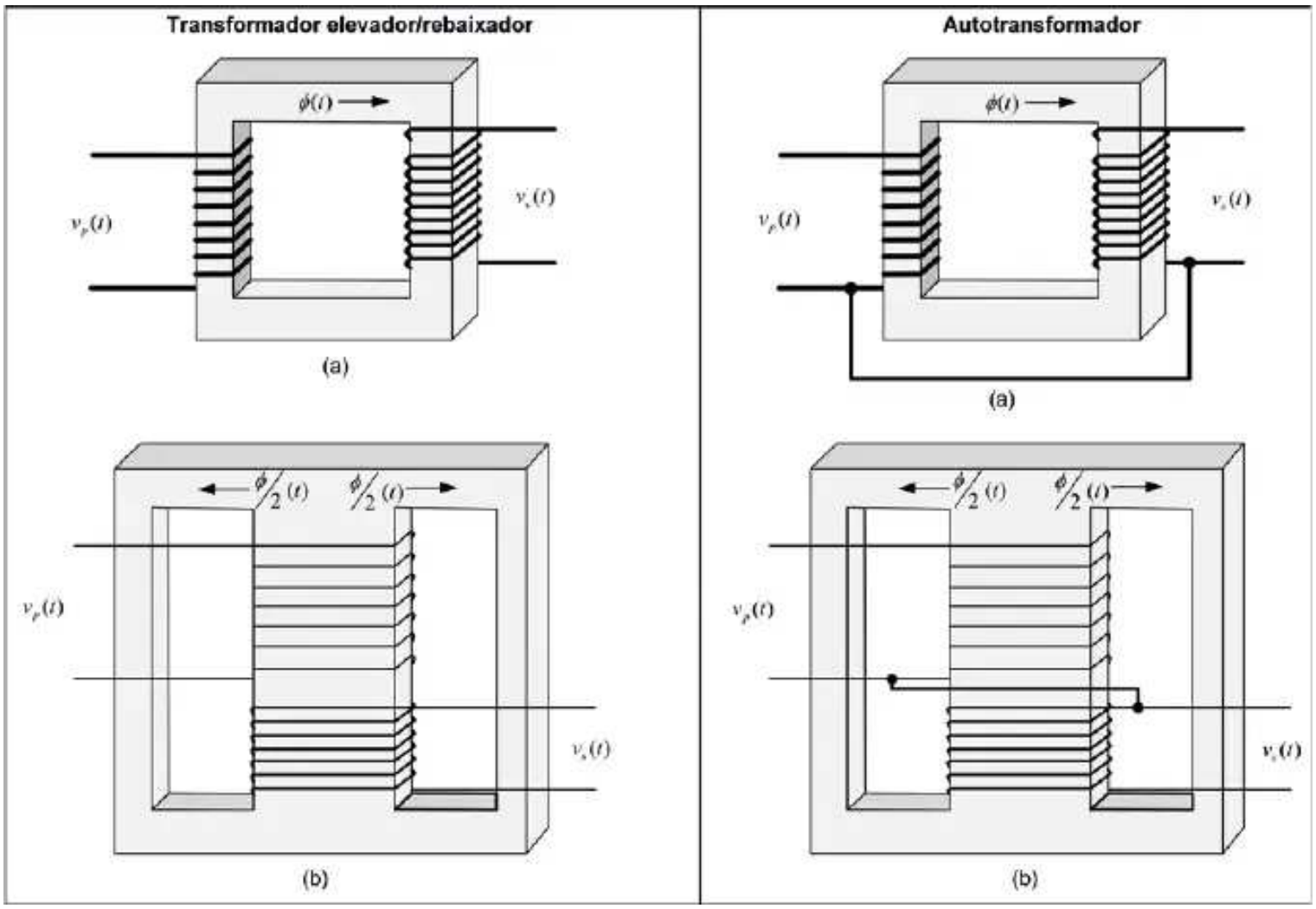


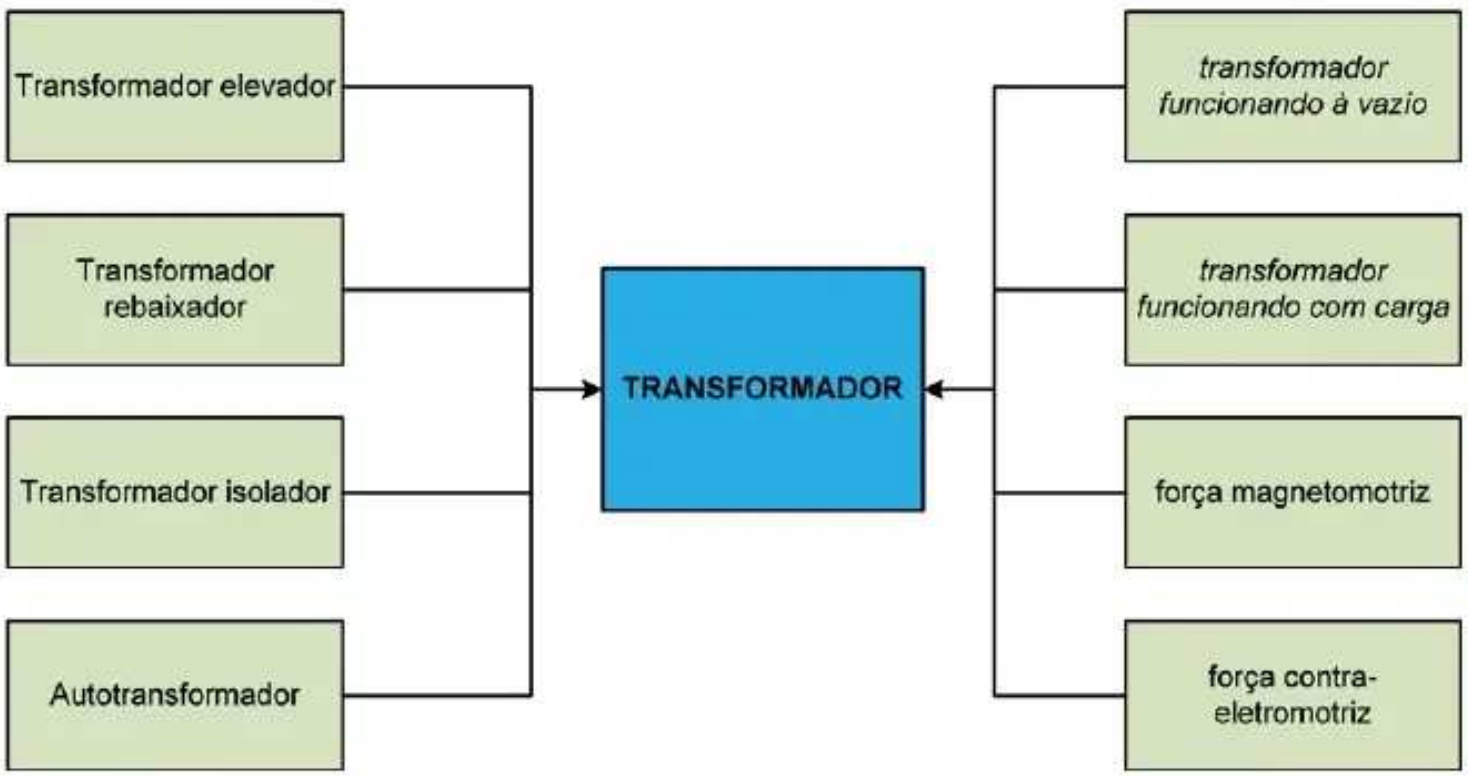
Figura 8 - Topologias de transformadores - enrolamentos e nomenclaturas / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra topologias de enrolamentos de transformadores monofásicos, onde temos quatro representações esquemáticas em que a primeira representação remete a um transformador de núcleo envolvido que pode ser tanto um transformador rebaixador ou elevador. Na segunda representação, temos um transformador com núcleo envolvente, que permite também a mesma construção do núcleo anterior, já nas representações 3 e 4, temos autotransformadores, tanto para núcleo envolvido quanto para núcleo envolvente, onde no último caso os enrolamentos primário e secundário são interligados.

O conhecimento do funcionamento de um transformador permite ao estudante entender a dinâmica de outras máquinas elétricas, como, por exemplo, o motor de indução. Além disso, ao interpretar as variáveis e limitações associadas ao transformador, o aluno tem condições de avaliar a relação de dependência entre variáveis em máquinas elétricas.

Os ambientes profissionais tangem o projeto de transformadores, instalação e uso de transformadores, manutenção de equipamentos eletrônicos, dimensionamento de sistemas de alimentação baseado em rebaixamento ou elevação de potencial, entre outros.

Olá, caro(a) estudante, chegamos ao final de mais uma unidade e agora convido você a revisar os principais conceitos que aprendemos ao longo desta etapa, onde aprendemos sobre os transformadores. Para isso, considere os seguintes termos dados pelo mapa conceitual a seguir e, em seguida, preencha seu próprio mapa conceitual com as definições de cada termo.



MAPA MENTAL

1. **Um engenheiro eletricista ao projetar um transformador monofásico se deparou com uma situação onde é necessário optar por um tipo de núcleo onde os enrolamentos primário e secundário serão submetidos. Ao analisar os tipos de núcleos, o profissional optou por um núcleo envolvente. Sobre o núcleo envolvente, é correto afirmar que:**

   a) Consiste no enrolamento dado nas laterais do núcleo, onde o fluxo é disperso como $\Phi/2$ uniformemente.
   b) Consiste no enrolamento dado no centro do núcleo, onde o fluxo é disperso como $\Phi/2$ uniformemente.
   c) Consiste no enrolamento dado nas laterais do núcleo, onde $3\Phi/4$ uniformemente variado.
   d) Consiste no enrolamento dado no centro do núcleo, onde o fluxo é disperso como $2\pi fC$ uniformemente.
   e) Consiste no enrolamento dado nas laterais do núcleo, onde o fluxo é disperso como $\Phi.\Re/2$ uniformemente.

2. **Nos transformadores, a relutância magnética tem um papel fundamental na definição do uso das chapas de aço-silício para a construção da máquina elétrica, uma vez que esta característica pode influenciar diretamente sobe o desempenho dela. Sobre a relutância em transformadores, é correto afirmar que:**

   a) Para a operação a vazio de um transformador, o menor valor da corrente de magnetização é obtido quando temos o menor valor de relutância.
   b) Para a operação com carga de um transformador, o maior valor da corrente de magnetização é obtido quando temos o maior valor de relutância.
   c) A relutância magnética consiste na capacidade de um metal em atrair outros metais.
   d) A relutância magnética é diretamente proporcional à corrente de magnetização do núcleo saturado e inversamente proporcional à f.c.e.m. do enrolamento secundário.
   e) A relutância magnética é uma propriedade inerente de todos os metais, e aqueles que apresentam valores maiores do que 7 podem ser considerados paramagnéticos.

AGORA É COM VOCÊ

3. **Ao analisar o funcionamento de um transformador, um engenheiro notou que entre os regimes de operação em vazio e com carga haviam algumas diferenças fundamentais, das quais podemos afirmar que:**

a) Quando um transformador está operando a vazio, a corrente no enrolamento secundário é zero e, com isso, não há f.e.m. induzida neste enrolamento.

b) A f.e.m. produzida no enrolamento primário está em fase com a corrente magnetizante do núcleo e com a tensão de alimentação do enrolamento primário.

c) Com carga acoplada não há formação de fluxo disperso, pois a carga consome todo o fluxo magnético existente no núcleo.

d) O regime a vazio em um transformador consiste que o fluxo que se propaga pelo núcleo irá induzir uma tensão no enrolamento secundário e uma corrente proporcional ao quadrado da sua relutância.

e) O regime de funcionamento de um transformador é determinado pela necessidade de f.e.m.

AGORA É COM VOCÊ

6 Transformadores - dimensionamento

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Nesta unidade, você terá a oportunidade de aprender sobre o dimensionamento de transformadores utilizando os conceitos aprendidos nas unidades anteriores com imersões em circuitos magnéticos e suas interações.

Quando você liga o chuveiro para tomar aquele banho quente, ao mesmo tempo pode haver outra pessoa ligando o forno de micro-ondas para aquecer o alimento e o forno elétrico da casa ao lado pode estar assando aquele delicioso bolo. Todos esses equipamentos exigem certa potência que garanta a execução em paralelo de todas essas tarefas.

Em termos de energia elétrica, dependemos de um transformador para adequar os potenciais elétricos de acordo com nossa necessidade, pois conforme estudamos, a tensão de distribuição é dada em milhares de volts, e necessitamos de apenas uma pequena fração dela, em torno de 127 V ou 220 V. No entanto, não apenas a tensão disponibilizada pelo transformador é importante, a corrente também é, pois determina a potência que iremos exigir do transformador, uma vez que, se o chuveiro ligado representa 6000 W, o forno de micro-ondas de 1500 W e o forno elétrico com 1750 W de potência, já temos um total de 9250 W sendo consumidos simultaneamente, sem contar com a potência de outros dispositivos menores, como lâmpadas LED que estejam acionadas ao mesmo tempo em um pequeno trecho de sua rua.

Sabendo-se que o transformador da sua rua é o responsável por prover a potência necessária a estes dispositivos, você sabe como o transformador é dimensionado para garantir que possamos ter tensão e a corrente sem interrupções dentro de limites seguros em nossos lares e empresas?

O transformador é uma máquina elétrica que, por meio da indução eletromagnética, transfere potência de seu enrolamento primário para o enrolamento secundário, tendo, ao longo desse processo, perdas que remetem ao material do qual foi fabricado, limitações de suas dimensões e de carga.

No sistema de distribuição, utilizam-se transformadores monofásicos e trifásicos, com seus enrolamentos associados de forma a adequar as tensões de entrada e também a obter o valor da tensão desejada, normalmente em Δ (triângulo) ou em Y (estrela). Por exemplo, o fechamento de um transformador de distribuição que converte $13,8\ kV$ em $220\ V$ tem seu enrolamento primário associado em Δ e seu enrolamento secundário associado em Y, onde o ponto central da estrela é a convergência das três bobinas e, portanto, o terminal neutro, sendo os demais extremos as três fases (A, B e C).

A potência de um transformador depende de vários critérios sendo que o principal é a carga a ser alimentada. Quando um transformador é dimensionado, a carga que será alimentada determina a potência necessária. Logo, uma indústria que consome até $50\ kVA$ de potência e amplia sua capacidade produtiva, inserindo mais máquinas com aumento de 50% da carga instalada, passa a necessitar então de um transformador de $75\ kVA$.

Em cargas menores, são utilizados transformadores monofásicos de pequenas potências, como no caso de eletrodomésticos antigos, por exemplo, onde a fonte de alimentação eletrônica depende de baixas tensões com correntes da ordem de poucos ampères ou miliamperes.

Há também os casos onde um equipamento (uma ferramenta elétrica, por exemplo) consome determinada potência ($900\ VA$) em tensão de $220\ V$ e só há tomadas com $127\ V$ disponíveis na instalação, logo, é necessário um autotransformador para resolver o problema, com capacidade de potência que atenda à demanda, que, no exemplo, será de aproximadamente $1\ kVA$.

Para dimensionar um transformador, é necessário ter acesso às dimensões das chapas que serão utilizadas em sua confecção, tipos de condutores, materiais isolantes, sistema de fixação, esmaltes ou vernizes etc. Além disso, é importante entender a necessidade de ventilação forçada ou até mesmo proteção térmica dentro dos enrolamentos, pois os transformadores geralmente apresentam perdas que resultam em aquecimento, o qual deve ser dissipado para manter a integridade da máquina.

Em nossas residências, podemos ter vários dispositivos elétricos que dependem de alimentação da rede da concessionária, sendo necessário utilizar a potência disponibilizada pelo transformador de distribuição para utilizar cada dispositivo elétrico em nossas casas e empresas. Pensando nessa dependência de potência, convido você a fazer uma atividade relacionada. Vamos lá?

Primeiro, peço que faça um levantamento dos dispositivos que você tem em sua residência que podem ter o uso simultâneo. Por exemplo, o chuveiro elétrico, forno de micro-ondas, forno elétrico, ferro de passar, refrigerador, ar-condicionado e as lâmpadas da casa que estariam acesas no período de uso.

Fez? Agora, de posse da lista de dispositivos, associe a cada um seu respectivo consumo de potência e faça a soma de todas as potências individuais, prevendo uma situação limite de uso concomitante (simultâneo).

Então, qual foi o resultado? Bom, uma vez conhecido o valor da potência que sua carga pode consumir ao mesmo tempo, agora você deve contar quantas residências são alimentadas por este transformador e, na sequência, faça uma estimativa de consumo dessa amostra.

Ah, lembre-se de considerar o valor médio de consumo igual ao consumo de sua residência, multiplicando a potência total encontrada na sua casa pelo número de residências, assim, você terá uma estimativa da potência que no mínimo é atendida por aquele dispositivo.

Quando o transformador é dimensionado, é levado em conta o tipo de carga a ser alimentada, tensões de entrada e de saída e a potência atendida por esta máquina. Em função disso, imagine uma situação em que, em uma das casas de sua rua seja construída irregularmente uma outra casa nos fundos e que, por meio da casa da frente, a casa dos fundos seja alimentada eletricamente sem que a companhia de energia seja informada.

A nova residência irá corresponder a mais um consumidor de energia conectado à rede elétrica daquela rua, cujo transformador foi dimensionado para atender de acordo com a carga das residências oficialmente instaladas, porém, nesse caso, houve o acréscimo da carga instalada no mesmo transformador, que poderia estar no limite de sua carga admissível e que agora será solicitado com intensidade superior à qual seu limite de operação foi projetado para atender, podendo até mesmo atuar os dispositivos de proteção contra sobrecargas ou curtos-circuitos.

No caso de sobrecarregar o transformador, já sabemos que podemos solicitar um transformador maior, que possa atender à demanda de carga, porém, se ocorrer o contrário e a metade das residências da sua rua ficarem vazias, ou seja, se as pessoas forem embora e com isso apenas 50% da carga do transformador é utilizada (transformador passa a ser superdimensionado), o que ocorre com a potência reativa deste transformador? Este fato corresponde a uma situação positiva ou negativa sob o ponto de vista de operação da máquina elétrica?

Com base nessa reflexão, relacione 5 exemplos de casos onde a carga instalada possa variar sazonalmente de modo a permitir o superdimensionamento de uma máquina elétrica indutiva, como no caso de um transformador ou motor elétrico, e como resultado disso, produzir potência reativa que corresponde a um sério problema no sistema de distribuição sob o ponto de vista de uso eficiente da energia elétrica.

DIÁRIO DE BORDO

Dimensionar um transformador depende de análise e atendimento a limites finitos estruturais elétricos e mecânicos. Normalmente, utilizamos na prática dois tipos de circuitos magnéticos para a construção dos transformadores, sendo eles chamados de **núcleo envolvido** ou **núcleo envolvente** (MARTIGNONI, 1971).

Em transformadores de **núcleo envolvido**, os enrolamentos são inseridos de modo a envolverem o circuito magnético, não sendo envolvidos por ele. Já no **núcleo envolvente**, os enrolamentos são envolvidos pelo circuito magnético ao serem enrolados nele. A Figura 1 apresenta dois exemplos de transformadores monofásicos.

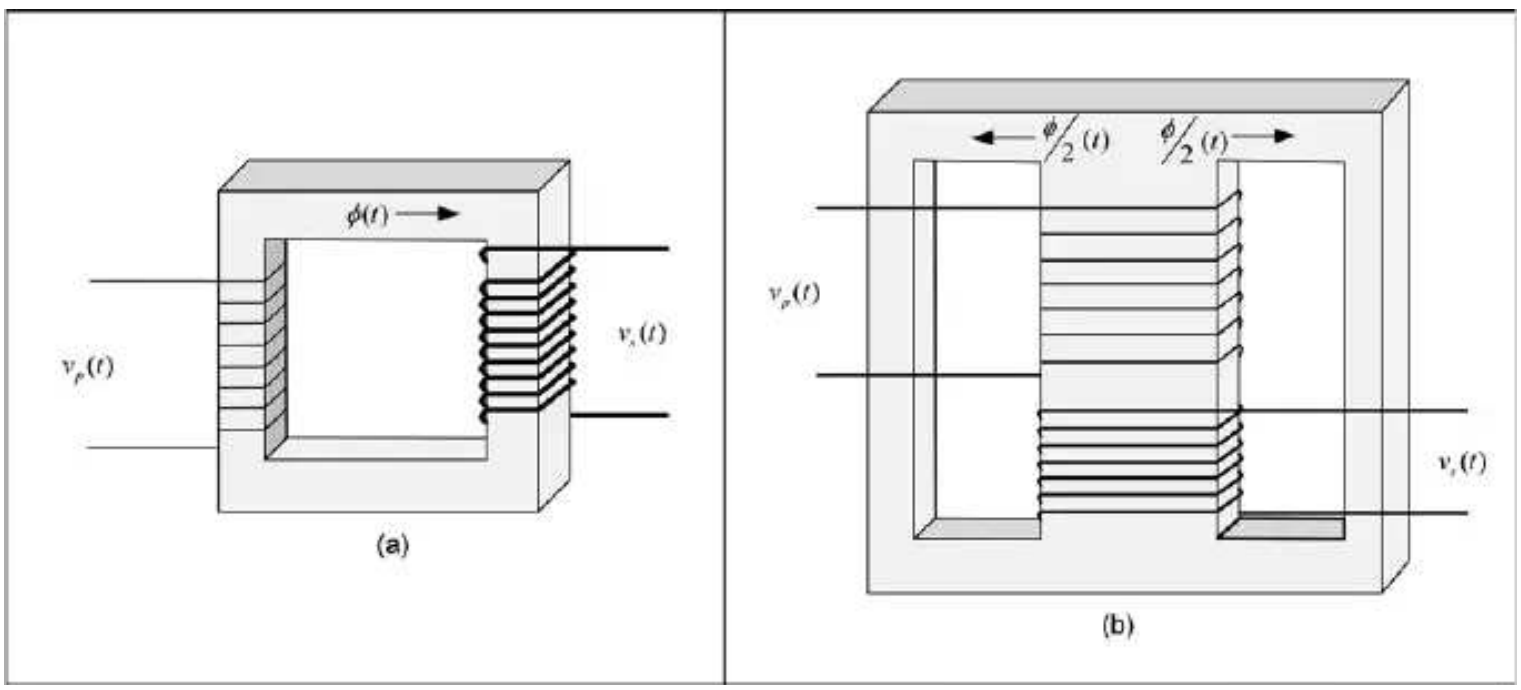


Figura 1 - Transformadores - (a) com núcleo envolvido e (b) com núcleo envolvente / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura apresenta dois tipos de transformadores, sendo um montado com núcleo envolvido e o outro com núcleo envolvente. No primeiro, os enrolamentos envolvem o núcleo sem serem envolvidos pelo circuito magnético, já o transformador de núcleo envolvente tem os enrolamentos envolvendo o núcleo e sendo envolvidos pelo circuito magnético.

Na Figura 2 (a), temos um transformador cujos enrolamentos estão dispostos de modo a envolverem o circuito magnético sem serem envolvidos por ele, portanto, caracterizando o núcleo envolvido, já em (b) podemos observar que os enrolamentos ocorrem no núcleo, de modo a serem envolvidos pelo circuito magnético, o que caracteriza o núcleo envolvente, também conhecido como núcleo encouraçado.

(a) (b)

Figura 2 - Transformadores: (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente

Descrição da Imagem: esta figura apresenta duas fotos de dois transformadores, sendo um com núcleo envolvido e outro com núcleo envolvente. Observa-se que em ambos os casos há condutores mais espessos e outros mais finos, correspondendo ao enrolamento de baixa e de alta tensões, respectivamente. Além disso, os núcleos têm formação extremamente diferente, onde o de núcleo envolvido apresenta as bobinas posicionadas em torres laterais enquanto o modelo de núcleo envolvente possui as bobinas localizadas no centro de sua estrutura.

As chapas de aço-silício que constituem os transformadores têm normalmente entre 1,5 e 3% de silício em sua composição e possuem espessuras que podem ter entre 0,5 mm e 0,3 mm.

Conforme já estudamos na unidade anterior, sabemos que para termos uma corrente de magnetização mínima é necessário ter valores de relutância também mínimos, e que a presença de interrupções na extensão das chapas do transformador pode resultar em perdas. O ideal seria que o núcleo fosse dotado de um material sólido e sem emendas, porém, isso dificultaria muito a sua montagem, que por razões óbvias tem seus enrolamentos produzidos externamente e depois inseridos no núcleo que somente assim é montado com as bobinas prontas. A Figura 3 mostra um exemplo de chapas “E” empilhadas de modo a formar um núcleo de transformador.

Figura 3 - Chapas “E” para transformador

Descrição da Imagem: esta figura mostra chapas “E” do núcleo de transformador empilhadas.

Quando um transformador é montado, temos a transferência de potência entre seus enrolamentos primário e secundário, onde parte dessa potência é dissipada na forma de “perdas” de potência, que iremos estudar a partir de agora.

Uma das principais perdas ocorre pelo que chamamos de “**correntes parasitas**”, que correspondem às correntes induzidas nas próprias chapas metálicas do núcleo, que estão imersas no campo magnético e se opõe ao fluxo que as produz, assim, correspondendo a perdas significativas. Uma maneira de se reduzir este efeito é isolando-se uma chapa da outra em uma composição de núcleo de chapas de aço-silício.

Podemos estimar as **perdas por correntes parasitas** no núcleo por meio da equação:

$$W_p = 10^{-12} \frac{\pi^2}{8\rho} . B_M^2 . f^2 . \delta^2 . S$$

Equação 1

Em que:

W_p: é a perda de potência dada em $Watts$;

ρ : é o valor da resistividade do material das lâminas, dado em micro-ohms-centímetro;

B_M : é a indução máxima das lâminas;

f : é a frequência que imprime a variação do fluxo;

δ : espessura da lâmina; e

S : volume em cm^3 das lâminas.

Quando nos referimos à quantidade de $1\ kg$ de lâminas, podemos aproximar a Equação 1 da Equação 2:

$$\omega_p = p_p \left(\delta . \frac{f}{50} . \frac{B_M}{10000} \right)^2$$

Equação 2

Em que p_p é um coeficiente que depende do material das lâminas, dado na Tabela 1, δ é a espessura da lâmina em mm e a perda por correntes parasitas e "ωp" para $1\ kg$ de material é dado em W / kg.

Há também a já citada histerese, que, por sua vez, corresponde a um tipo de perda no transformador e que pode ser determinada utilizando-se a equação de Steinmetz (MARTIGNONI, 1971):

$$W_b = 10^{-7} . \mu . B_M^{1,6} . f . V$$

Equação 3

Logo, a **perda por histerese** "W_b" é dada em W, onde V é o volume do material e μ é o coeficiente de Steinmetz, o qual depende de cada material utilizado na fabricação do transformador. Esta perda também pode ser estimada por uma unidade de massa, por exemplo, para $1\ kg$ de chapas (lâminas), medido em W / kg, sendo determinado pela Equação 4 para $B_M < 10000\ gauss$:

$$\omega_h = p_h \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10000} \right)^{1,6}$$

Equação 4

Já em casos onde $B_M > 10000\ gauss$, fica:

$$\omega_h = p_h \frac{f}{50}\left(\frac{B_M}{10000}\right)^2$$

Equação 5

Para determinar o valor das perdas totais no núcleo do transformador "ωf_e", devemos somar as perdas por correntes parasitas com as perdas por histerese, conforme Equação 6, lembrando-se que há outras perdas envolvidas nos condutores de cobre, que não estão sendo relacionadas aqui, pois estamos nos referindo ao núcleo do transformador.

$$\omega f_e = \omega_p + \omega_h = p_p\left(\delta.\frac{f}{50}.\frac{B_M}{10000}\right)^2 + p_h\frac{f}{50}\left(\frac{B_M}{10000}\right)^2$$

Equação 6

Qualidade das lâminas	W/kg @ $f = 50\ Hz$, $\delta = 0,5\ mm$ e $B_M = 10000\ gauss$	p_p	p_h
lâminas normais	3,6	4,8	2,4
lâminas com baixa concentração de silício	3,0	2,6	2,3
lâminas com silício	1,7	1,1	1,4

Tabela 1 - Perdas no transformador - valores referenciais / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Na Tabela 1, podemos observar valores de p_p e p_h aplicados a casos onde podemos ter diferentes qualidades de lâminas, sendo consideradas **lâminas normais, lâminas de baixa concentração de silício** e **lâminas com silício normalizado**.

Observe que a frequência referencial para esta tabela foi de $50\ Hz$ e que nas condições impostas, utilizando-se a Equação 6, produzem para cada uma das qualidades de lâminas supracitadas os valores de perdas totais em W/kg.

Como referência, há valores de perdas dados por tabela de acordo com o fabricante, que no caso do exemplo, a empresa Acesita disponibiliza as seguintes informações conforma a Tabela 2:

Chapa de transformadores – Acesita: Esp. *0,35 mm; f = 50Hz*						
Tipo	ω_{10}	ω_{15}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}
	W / kg	*W / kg*	*Gauss*	*Gauss*	*Gauss*	*Gauss*
Acesita 170 - 35	1,51 *a* 1,70	*4,0 a 4,2*	*14.300*	*15.500*	*16.500*	*18.500*
Acesita 160 - 35	1,46 *a* 1,60	*3,6 a 4,0*	*14.300*	*15.500*	*16.500*	*18.500*
Acesita 145 - 35	1,28 *a* 1,45	*3,2 a 3,6*	*14.300*	*15.500*	*16.500*	*18.500*
Acesita 127 - 35	1,16 *a* 1,27	*2,8 a 3,2*	*14.300*	*15.500*	*16.500*	*18.500*
Acesita 115 - 35	1,04 *a* 1,15	*2,5 a 2,8*	*14.300*	*15.500*	*16.500*	*18.500*
Acesita 100 - 35	< 1,03	< 2,5	*14.300*	*15.500*	*16.500*	*18.500*
Para frequências de 60 *Hz* , deve-se multiplicar os valores da tabela por *1,25* .						

Tabela 2 - Características das chapas da Acesita / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Esta tabela mostra perdas em W / kg entre ω_{10} e ω_{15}, correspondentes aos valores de indução máximo para as chapas entre *10.000* e *15.000* *Gauss* , para frequência de 50 *Hz* , em que B_{25}, B_{50}, B_{100} e B_{300} são os respectivos valores de indução eletromagnética para a formação da f.m.m. de 0,25 , 0,50 , 100 e 300 *Ampère – espira*.

Quando estudamos o comportamento de um transformador a vazio, precisamos entender os conceitos que aprendemos anteriormente sobre as resistências ôhmicas dos enrolamentos e a dispersão magnética serem nulas, assim como as perdas por histerese e as correntes parasitas no núcleo.

Para isso, vamos considerar que durante a operação a vazio, o transformador apresenta apenas uma corrente magnetizante i_μ destinada apenas à produção do fluxo magnético Φ.

Entretanto, surgem, nestas condições, também as correntes i_o (corrente a vazio ou corrente de excitação) e i_a (corrente ativa). A corrente i_μ é alinhada em fase com o fluxo magnético Φ, enquanto que a corrente i_a é alinhada em fase com a tensão que alimenta o circuito magnético e deve compensar as pequenas perdas no núcleo magnético. A Figura 4 mostra que i_o é a resultante entre as correntes i_μ e i_a.

Para calcular a corrente a vazio de um transformador, devemos considerar as perdas no núcleo muito pequenas e conhecer primeiramente as componentes i_μ e i_a, para isso, precisamos recorrer ao cálculo da força eletromotriz (E_1) e posteriormente do fluxo magnético (Φ_M) que irá estabilizar a tensão $v_1(t)$. Considerando-se que em operação a vazio as perdas são ínfimas, podemos fazer $v_1(t) = E_1$, daí:

$$\Phi_M = 10^{-8} \frac{v_1(t)}{4,44.f.N_1}$$

Equação 7

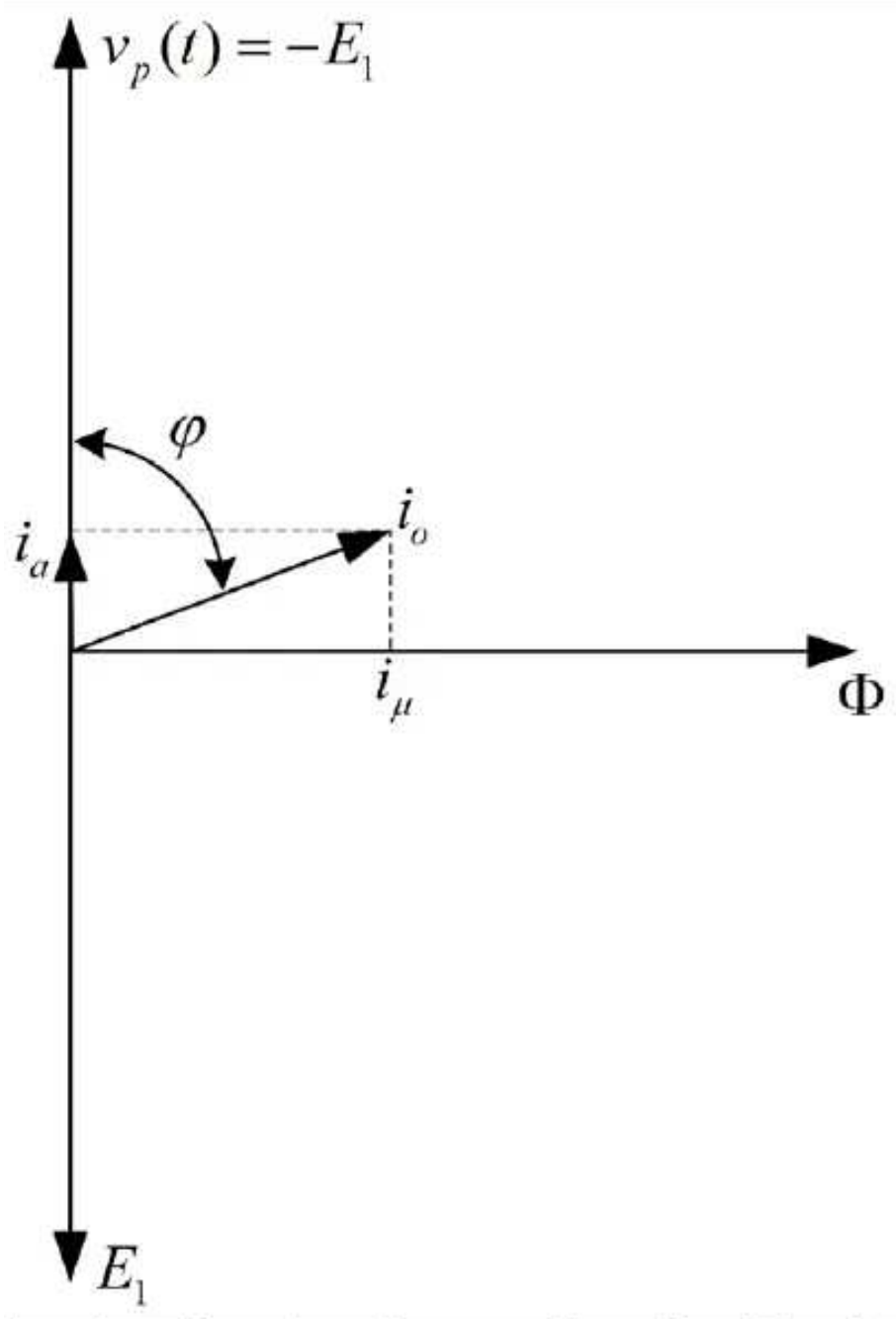


Figura 4 - Diagrama fasorial para operação a vazio do transformador
Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um diagrama fasorial para operação a vazio do transformador onde as tensões e as correntes são representadas, onde a corrente de magnetização está alinhada em fase com o fluxo magnético e a corrente ativa está alinhada com a tensão de alimentação, e surge na resultante entre essas correntes (i_μ e i_a) a corrente de excitação i_o.

Considerando-se núcleo de colunas, podemos calcular a indução máxima para este núcleo como sendo:

$$B_{Me} = \frac{\Phi_M}{S_e}$$

Equação 8

e

$$B_{Mt} = \frac{\Phi_M}{S_t}$$

Equação 9

Em que B_{Me} é a **indução máxima nas colunas** (igual à indução nas juntas) e B_{Mt} a indução máxima nas travessas do núcleo, onde S_e é a seção da coluna e S_t a seção da travessa do núcleo dadas em centímetros quadrados.

Com os valores de B_{Mt} e B_{Me}, deve-se então calcular o valor das perdas em W/kg que se referem às travessas e às colunas, que ao serem multiplicadas pela sua respectiva massa (das colunas e das travessas), obtém-se as perdas totais, considerando-se um desconto entre 10 a 12% da seção de área das travessas e colunas referente à camada isolante.

Considera-se W_o a potência consumida pelo transformador operando a vazio, com determinada tensão $v_1(t)$ aplicada em seu enrolamento primário, com o surgimento de uma corrente ativa i_a e seu enrolamento secundário aberto. Assim, matematicamente, fica para um transformador monofásico:

$$i_a = \frac{W_o}{v_1(t)}$$

Equação 10

Já o dimensionamento da corrente magnetizante deriva da relação entre a corrente e o número de espiras no enrolamento para produzir o fluxo necessário. Esta relação é denominada de **Ampère-espiras máxima** "A_{eM}", que para um núcleo envolvido de duas colunas e duas travessas com 4 juntas e os fatores de correção de tabela, é dado por:

$$A_{eM} = 2(A_{e_e})_1.h + 2(A_{e_c})_2.g + 4.0,8.B_{Me}.I_e$$

Equação 11

Em que $(A_{e_e})_1$ é o número de Ampère-espiras por centímetro no que se refere às colunas do núcleo, valor que pode ser obtido por tabelas de correspondências de indução (MARTIGNONI, 1971). Sendo h a altura da coluna dada em centímetros, $(A_{e_c})_2$ é o número de Ampère-espiras por centímetro no que se refere às travessas, remetendo, respectivamente, à Equação 8 e Equação 9 e sabendo-se que g é o comprimento da travessa em centímetros e l_e é a espessura do entreferro de cada junta.

Assim, finalmente, podemos calcular o valor máximo de corrente magnetizante como sendo:

$$i_{\mu M} = \frac{A_{eM}}{N_1}$$

Equação 12

O cálculo do valor eficaz da corrente (i_μ) pode ser obtido a partir da Equação 13:

$$i_\mu = \frac{i_{\mu M}}{\sqrt{2}} = \frac{A_{eM}}{\sqrt{2}.N_1}$$

Equação 13

Uma vez determinadas i_a e i_μ, podemos calcular o valor da **corrente total a vazio**, além de seu fator de potência, sabendo-se que a corrente total a vazio é dada pela Equação 14:

$$i_o = \sqrt{i_a^2 + i_\mu^2}$$

Equação 14

Em que i_o é a **corrente a vazio do transformador**, conforme analiticamente podemos observar no diagrama da Figura 5:

Como podemos observar na Figura 5, o ângulo de defasagem da corrente a vazio e a tensão $v_p(t)$ é dado pela Equação 15:

$$tg\ \varphi_o = \frac{i_\mu}{i_a}$$

Equação 15

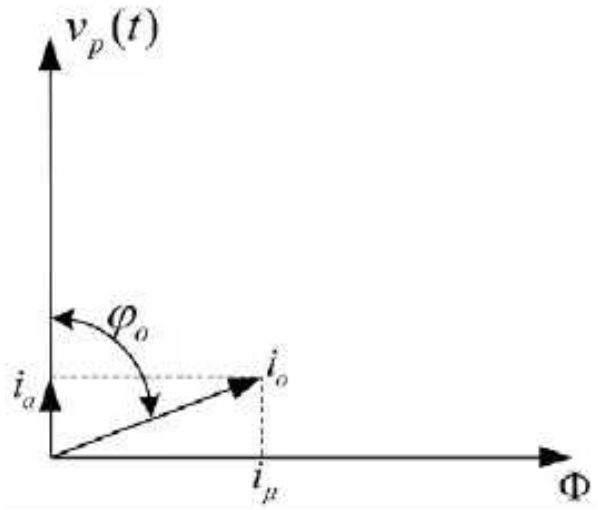


Figura 5 - Corrente a vazio
Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um diagrama fasorial onde a tensão $v_p(t)$ está em fase com a corrente i_a que tem a resultante i_o com relação à i_μ em Φ, onde φ_o é o ângulo entre a tensão $v_p(t)$ e i_o.

Assim, o **fator de potência a vazio** do transformador é o cosseno do ângulo φ_o ($\cos\varphi_0$), que é definido diretamente pela Equação 16:

$$W_0 = v_p(t).i_0\varphi_o$$

Equação 16

Para efeito analítico, temos que o fator de potência a vazio é sempre baixo, em torno de 0,1, pois a corrente i_o nessa condição está entre 1% e 6% da corrente primária.

Para o caso dos transformadores trifásicos, o cálculo da corrente a vazio leva em consideração que, para cada fase, temos um valor de tensão, corrente e, consequentemente, fluxo no domínio do tempo, dado que os comprimentos do circuito magnético são diferentes uns dos outros, diferentemente do que ocorre no modelo monofásico que só tem uma fase.

Em um transformador trifásico, observamos uma arquitetura onde os enrolamentos são dispostos nas colunas do núcleo de modo a se distribuírem uniformemente conforme mostrado na Figura 6.

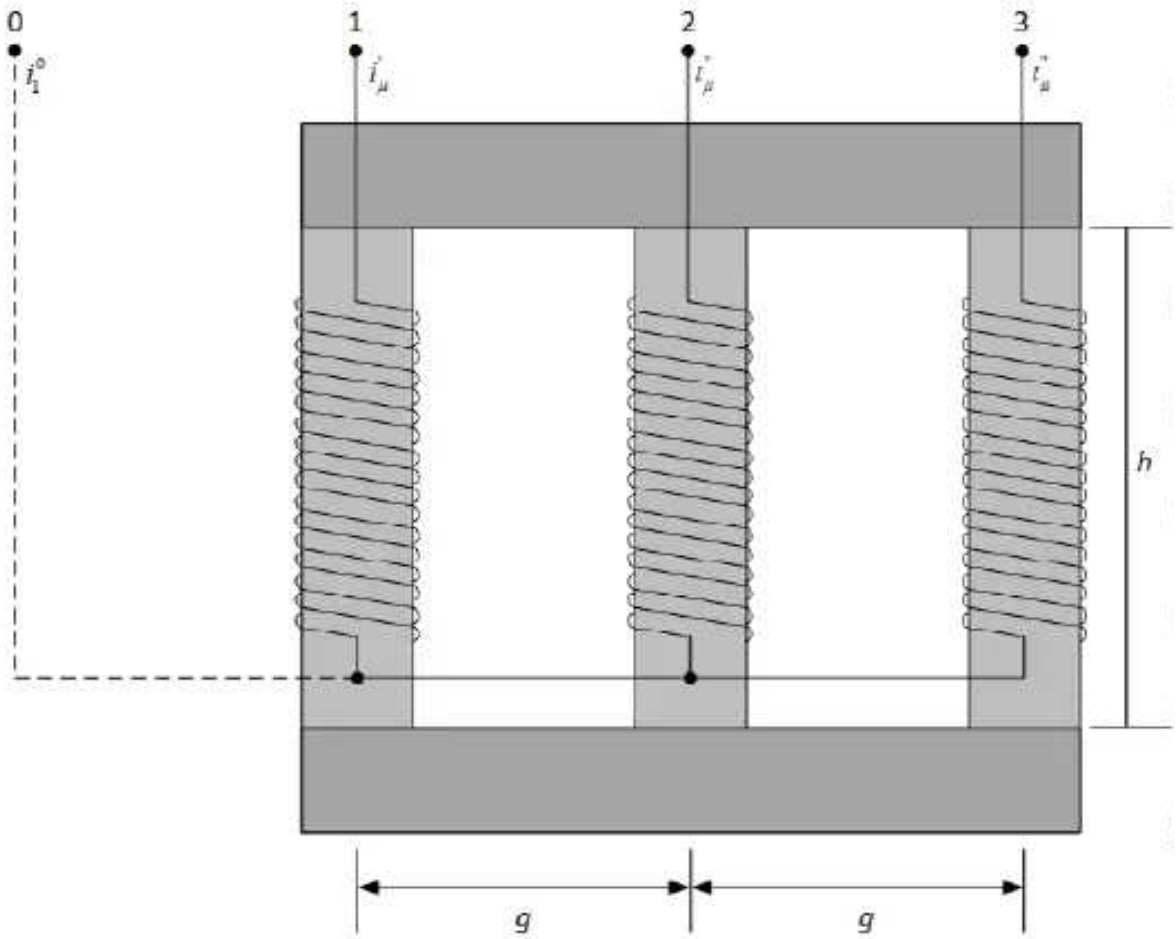


Figura 6 - Transformador trifásico - configuração de enrolamentos e componentes das correntes de cada fase
Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um diagrama que representa o transformador trifásico com fechamento em estrela, no qual cada uma das fases numeradas de 1 a 3 nas entradas dos enrolamentos fazem convergência no mesmo ponto no extremo de cada bobina ligada no terminal neutro, identificado como número "0". Além disso, é possível identificar os termos "g" e "h" do núcleo. As correntes magnetizantes i'_μ, i''_μ e i'''_μ são independentes umas das outras que possuem uma resultante dada no condutor neutro, desprovida de valor.

Uma vez aplicadas as tensões aos enrolamentos primários nos pontos 1, 2 e 3 da Figura 6, sendo senoidais e simétricas, produzem f.e.m. que as equilibram, tendo, então, os fluxos senoidais ocorrendo com a mesma natureza senoidal da tensão geradora, com defasagem de $120°$.

Lembrando que há defasagem da corrente com relação à tensão em um circuito magnético, podemos entender que o circuito magnético é assimétrico com a tensão de entrada (enrolamento primário) e, portanto, produz fluxos uniformes com as correntes magnetizantes que os produzem, diferentes entre si, no domínio do tempo. Na Figura 7, podemos observar a representação dos fluxos e das respectivas correntes magnetizantes responsáveis por sua geração e a defasagem prevista pela tensão aplicada nas fases.

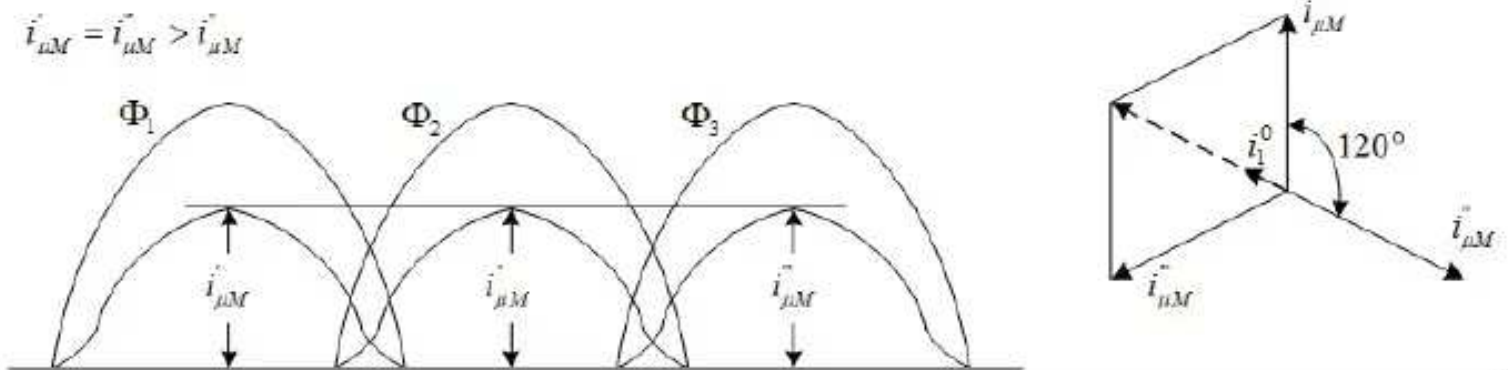


Figura 7 - Fluxos magnéticos e correntes em cada uma das fases 1, 2 e 3 / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um gráfico das correntes de magnetização de cada uma das fases e seus respectivos fluxos magnéticos. Há também um diagrama fasorial que representa cada uma das correntes nas fases e uma pequena corrente ocorrendo.

Cada fase externa possui dois circuitos magnéticos paralelos, onde observamos os comprimentos $(2h+4g \ e \ 2h+2g)$, sendo que a fase central tem dois circuitos magnéticos, sendo estes de comprimento $(2h+2g)$, isso resulta que a corrente na fase central é inferior à corrente nas fases externas "$\dot{i}'_{\mu M}$", sendo então nas fases externas dada pela Equação 17:

$$\dot{i}'_{\mu M} = \frac{(A_{e_c})_1.h + 2(A_{e_c})_2.g + 2.0,8.B_{Me}.I_e}{N_1}$$

Equação 17

Já para a fase central, dados os caminhos magnéticos, a corrente $\dot{i}''_{\mu M}$ fica:

$$\dot{i}''_{\mu M} = \frac{(A_{e_c})_1.h + 2.0,8.B_{Me}.I_e}{N_1}$$

Equação 18

Enfim, para compor o fator de potência a vazio do transformador trifásico, podemos utilizar um critério que aproxima o valor de W_o como sendo (BIM, 2012):

$$W_o = \sqrt{3}.v_p(t).i_a$$

Equação 19

Assim, para calcular o fator de potência do transformador trifásico, temos a seguinte relação dada por:

$$\cos\varphi = \frac{P_o}{\sqrt{3}.v_p(t).\frac{i_o^{'} + i_o^{''} + i_o^{'''}}{3}}$$

Equação 20

Você pode verificar as variáveis desta equação na Figura 6.

É importante ressaltar que ao projetarmos transformadores devemos considerar a resistência ôhmica representada pelos condutores dos enrolamentos de fio, o que podemos relacionar com a corrente da seguinte forma (KOSOW, 2005):

$$R_1.i_1^2 = \sim R_2.i_2^2$$

Equação 21

Que definimos como:

$$\frac{R_1}{R_2} = \sim \left(\frac{i_2}{i_1}\right)^2$$

Equação 22

Pois as perdas nos enrolamentos são dadas de maneira uniforme entre os enrolamentos primário e secundário.

Ao estudarmos os diagramas vetoriais dos transformadores com carga, devemos adotar para nosso estudo o padrão de um transformador industrial, em que ele se compara a um transformador ideal, com valores de resistência e dispersões nulas. O esquema da Figura 8 mostra as componentes resistivas e indutivas do circuito do transformador e seus enrolamentos.

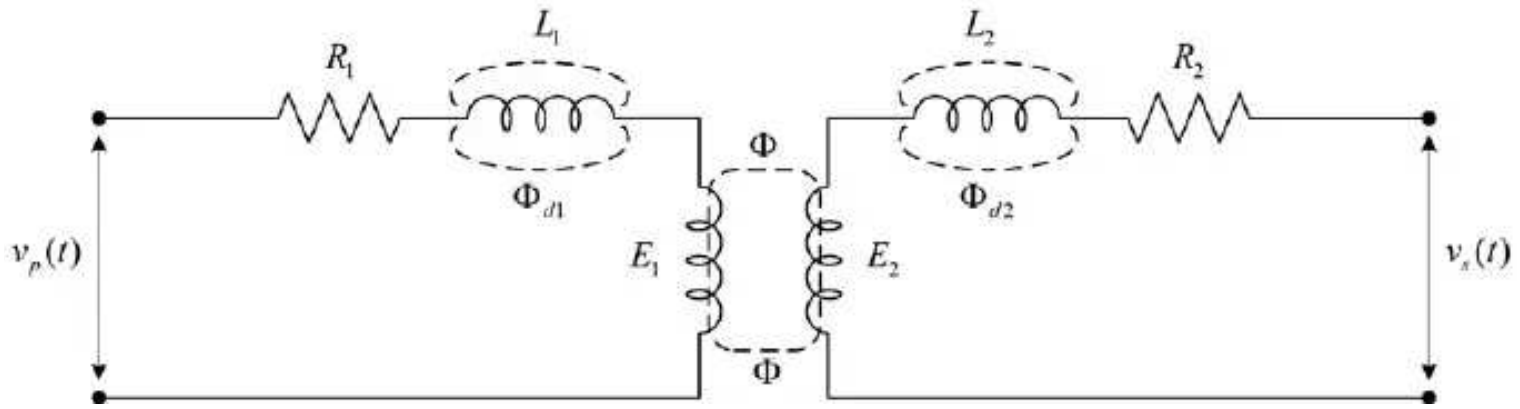


Figura 8 - Esquema de um transformador / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um diagrama elétrico de um transformador monofásico com suas componentes resistivas e indutivas relativas aos condutores de cobre e os elementos magnéticos em seus fluxos de indução, além de mostrar as tensões de entrada e saída e as f.e.m. de cada enrolamento primário e secundário.

Observe na representação dada na Figura 8 que temos as tensões de entrada e saída, $v_p(t)$ e $v_s(t)$, além das componentes resistiva e indutiva de cada etapa do circuito do transformador e os respectivos fluxos magnéticos em seus elementos indutivos. Temos ainda as f.e.m. induzidas nos enrolamentos. Esses são dados necessários para a representação de uma das fases de um transformador. Caso este seja trifásico, cada fase teria individualmente uma representação como esta, adotando que $v_p(t) = E_1$ e $v_s(t) = E_2$, pois desprezam-se as quedas de tensão por reatâncias ou resistências que não ocorrem em operação a vazio.

As f.e.m. produzidas a vazio nos indutores dos enrolamentos do transformador são, respectivamente:

Para o enrolamento primário:

$$E_1^0 = 10^{-8}.4,44.f.\Phi_0.N_1$$

Equação 23

Para o enrolamento secundário:

$$E_2^0 = 10^{-8}.4,44.f.\Phi_0.N_2$$

Equação 24

Essas que são defasadas de $90°$ ao fluxo Φ_0 gerador dessas f.e.m., em operação a vazio do transformador.

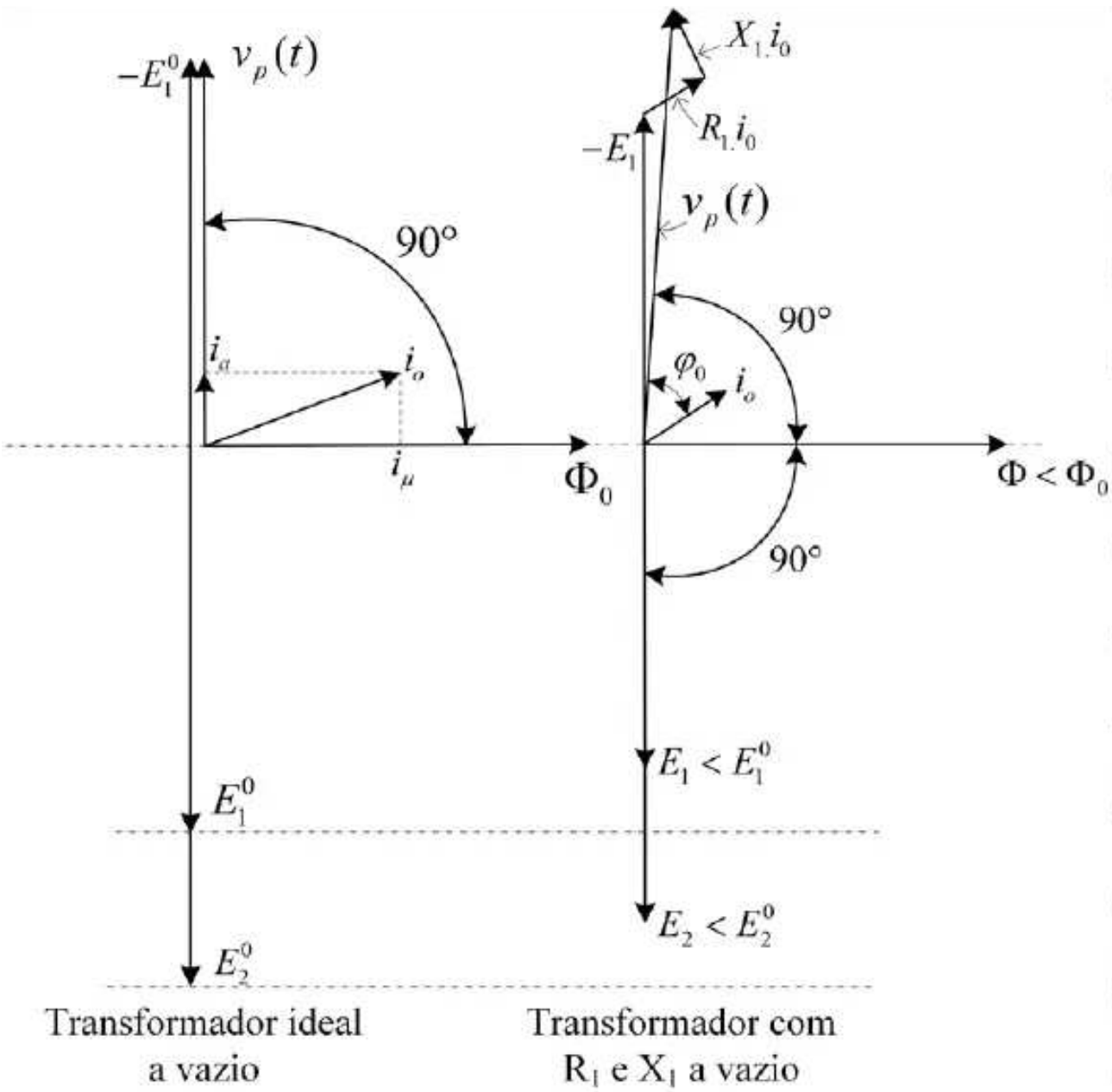


Figura 9 - Diagrama fasorial de um transformador: operação a vazio para modelo ideal e considerando elementos resistivos e reativos / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta o diagrama fasorial para operação a vazio de um transformador com modelo ideal e modelo que leva em consideração a resistência ôhmica e a reatância indutiva. É possível identificar os ângulos de defasagem, as tensões e f.e.m. de cada componente do diagrama.

O transformador é uma máquina estática, ou seja, não tem partes móveis, o que implica na dificuldade de trocar calor, sendo assim, o dimensionamento correto é fundamental para que não haja sobreaquecimento que resulta em perdas no processo de conversão eletromagnética de energia.

No caso de um transformador real, a resistência e a indutância possuem valores relevantes e são representadas conforme a Figura 8, sabendo-se que a corrente i_o produz como resultado uma queda de tensão proporcional ao valor de R_1 e da própria corrente i_o ($v_{R_1} = R_1.i_o$) que está em fase com i_o, além de uma outra queda de tensão dada por $X1.io$, que é defasada de $90°$ de io (adiantado), conforme podemos ver na Figura 9 para um transformador com R_1 e X_1 a vazio.

Com base na análise do circuito da Figura 8 e do diagrama fasorial da Figura 9, podemos afirmar matematicamente que:

$$v_p(t) = (\overline{-E_1}) + \overline{R_1.i_o} + \overline{X_1.i_o}$$

Equação 25

A partir dessa equação, podemos concluir que, para um transformador real, a f.e.m. produzida pela circulação da corrente i_o não será a mesma que prevista para o transformador ideal, uma vez que na prática teremos quedas de tensão reais no circuito, dadas pela resistência ôhmica e reatância indutiva. Assim, podemos adotar a relação matemática para fins de projeto:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Equação 26

em que

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1}.E_1$$

Equação 27

As relações dadas pela Equação 26 e Equação 27 mostram que:

$$E_2 < v_p(t).\frac{N_2}{N_1}$$

Equação 28

Esta equação nos informa que, em um transformador real a vazio, a f.e.m. no secundário será menor do que a relação de tensão prevista para um transformador ideal.

Já em um transformador ideal, sem adição de resistência ou reatância indutiva, a tensão no enrolamento secundário é igual à f.e.m. e, por consequência, proporcional à tensão aplicada no enrolamento primário vezes a relação entre as espiras do transformador, conforme apresentado na Equação 29.

$$V_2 = E_2 \sim v_p(t).\frac{N_2}{N_1}$$

Equação 29

Ao analisarmos o funcionamento de um transformador com carga, observamos particularidades importantes que nos permitem esboçar o diagrama fasorial dado na Figura 10:

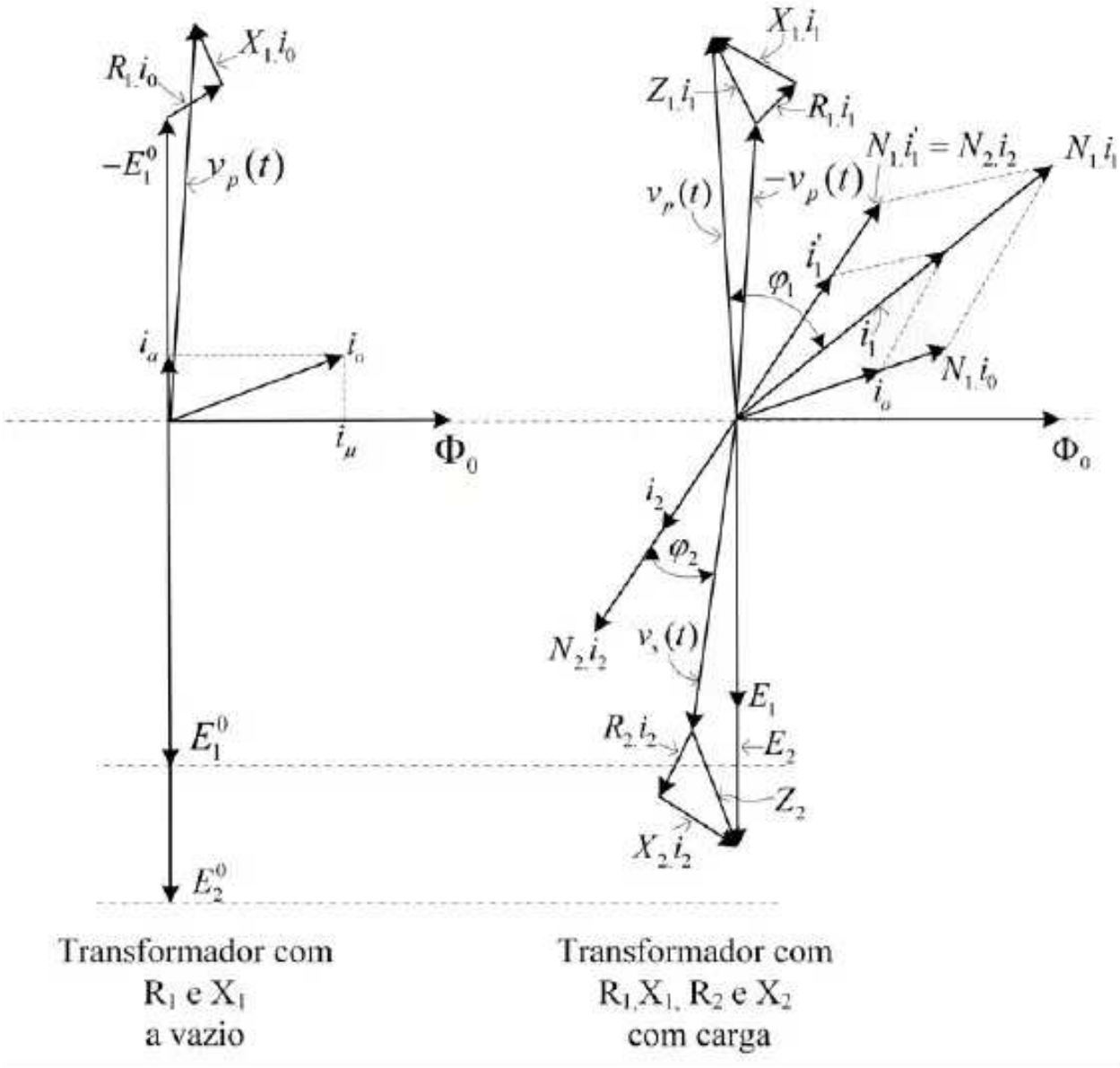


Figura 10 - Diagrama fasorial do transformador com carga / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura mostra diagramas representando as fases de correntes, tensões, reatâncias, quedas de tensão, fluxo magnético e seus alinhamentos ou defasagens, levando-se em consideração o transformador primeiramente a vazio e posteriormente à direita o transformador com carga.

O circuito dado pela Figura 11 mostra o transformador com carga acoplada e os respectivos componentes indutivos e resistivos. Note que a carga é representada pela união de um arranjo RL série, onde considera-se parte da resistência estática (resistência) e parte dinâmica (reatância indutiva).

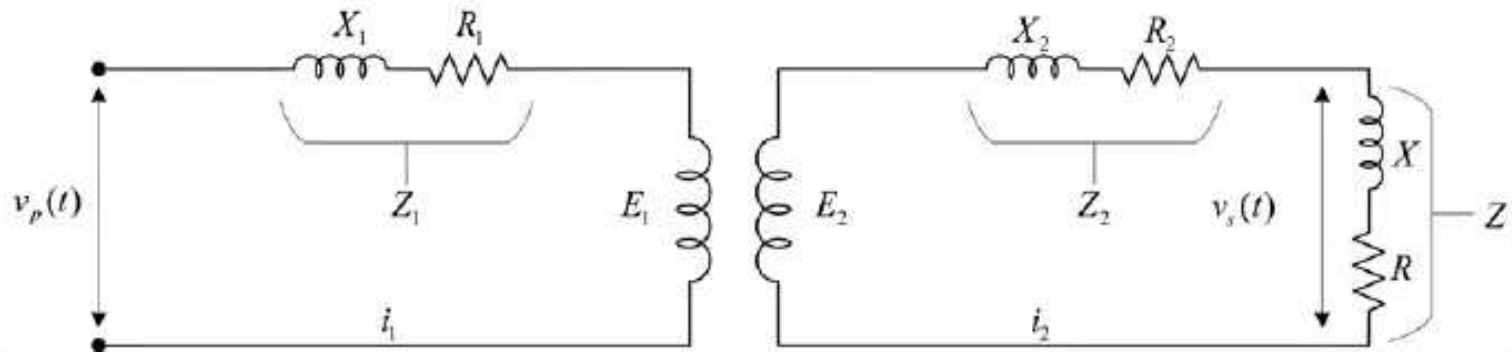


Figura 11 - Circuito magnético do transformador com carga "Z" / Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um diagrama de um circuito onde um transformador é apresentado com carga e seus elementos resistivos e indutivos são mostrados, sendo o indutor visto como uma reatância e o resistor como uma resistência.

Vamos realizar nesta etapa um ensaio de dimensionamento de transformador monofásico para mostrar os passos necessários ao projeto e execução deste componente.

O transformador que iremos dimensionar tem um enrolamento primário e um enrolamento secundário, conforme mostrado na Figura 12.

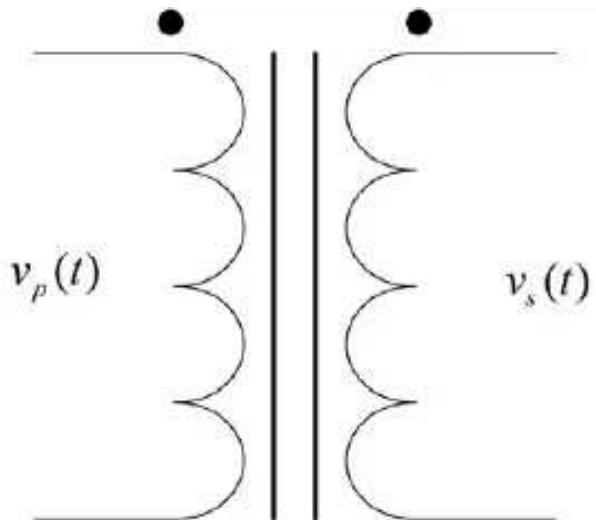


Figura 12 - Transformador monofásico com 1 enrolamento primário e 1 enrolamento secundário / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura apresenta o símbolo de um transformador monofásico com um enrolamento primário e um enrolamento secundário em fase entre si.

Convido você estudante para nosso podcast, onde nesta unidade iremos falar sobre o projeto de transformadores monofásicos e autotransformadores utilizados com frequência em eletrônica.

Primeiramente precisamos calcular a área da seção magnética " S_m " necessária para induzir determinada potência no secundário do transformador, parâmetro que depende das variáveis que iremos ver na Equação 30. Para este tipo de transformador da Figura 12, utilizaremos lâminas padronizadas de aço-silício, onde o cálculo da seção magnética é definido por:

$$S_m = 7,5\sqrt{\frac{W_s}{f}}$$

Equação 30

Sendo W_s a potência no enrolamento secundário e f a frequência de operação do transformador, que iremos adotar de $60\ Hz$ no Brasil, devemos adotar um fator de correção de 10% para perdas com correntes de fuga, perdas por histerese e perdas no cobre, logo, consideramos a **área de seção geométrica** " S_g " como sendo:

$$S_g = 1,1.S_m$$

Equação 31

É importante que, para minimizar as perdas no núcleo, este deve ter seção ao máximo próxima de um quadrado, o que na escolha do tipo de carretel e das lâminas (chapas) é possível estabelecer, então, considerando-se um núcleo quadrado, podemos afirmar que:

$$a = \sim \sqrt{S_g}$$

Equação 32

Tendo definido um modelo de lâmina de mercado, de acordo com as tabelas de fabricantes, podemos calcular o número de espiras por enrolamento, para isso, devemos entender de onde vieram os dados das equações, logo, o **número de espiras do enrolamento primário** (N_1), por exemplo, é dado por:

$$N_1 = \frac{v_p(t).10^8}{4,44.B_M.S_m.f}$$

Equação 33

Já vimos essas variáveis ao longo desta unidade e continuam sendo as mesmas nesta equação, e, para valores de tabela, considerando-se $B_M = 11300 \ \ Gauss$ e uma frequência de $60 \ Hz$, reescrevendo a Equação 33, fica:

$$N_1 = \frac{v_p(t)}{S_m}.\frac{10^8}{4,44.B_M.f}$$

Equação 34

Substituindo-se os valores dados, fica:

$$N_1 = \frac{v_p(t)}{S_m}.\frac{10^8}{4,44.11300.60}$$

$$N_1 = \frac{v_p(t)}{S_m}.33,22$$

Equação 35

Assim, para calcular o número de espiras de nosso transformador, iremos adotar este valor dado na Equação 35. No caso do enrolamento secundário, altera-se apenas o termo $v_p(t)$ para $v_s(t)$ daí então, determina-se N_2, que é o número de espiras do enrolamento secundário. Assim, fica:

$$N_2 = \frac{v_s(t)}{S_m}.33,22$$

Equação 36

Algumas literaturas adotam valores menores de indução e, por este motivo, a constante ($33,22$) pode variar com o tipo de chapa ou material utilizado e às vezes encontramos para este mesmo cálculo o valor aproximado de $33,5$. Na prática, adiciona-se 10% para compensar as perdas no transformador.

Quando isolamos o termo $v_p(t)$ da Equação 35, temos a relação que resulta na Equação 37:

$$N_1 = v_p(t).\frac{33,22}{S_m}$$

$$esp/v = \frac{33,22}{S_m}$$

Equação 37

Esta relação dada na Equação 37 é o que chamamos de relação espira por volt, ou simplesmente "esp/v", que corresponde ao número de espiras que o fio de cobre precisa realizar no núcleo para induzir um volt em seus terminais.

Dados os números de espiras de cada enrolamento, agora iremos conhecer a área de cobre enrolado, que leva em consideração o fio esmaltado dado em mm² para a corrente desejada em cada enrolamento; adotando-se um parâmetro referencial de densidade de corrente "d" média em torno de $3\ A/mm^2$, o cálculo da seção do enrolamento primário (S_p) fica:

$$S_p = \frac{i_p}{d} = [mm^2]$$

Equação 38

Em que i_p é a corrente no enrolamento primário. Já no enrolamento secundário, a seção de cobre (S_s) é dada por:

$$S_s = \frac{i_s}{d} = [^{mm^2}]$$

Equação 39

Em que i_s é a corrente no enrolamento secundário do transformador.

Primeiramente devemos determinar a corrente nos enrolamentos, sendo i_p e i_s as correntes nos enrolamentos primário e secundário, respectivamente:

$$i_p = \frac{W_p}{v_p(t)}$$

Equação 40

$$i_s = \frac{W_s}{v_s(t)}$$

Equação 41

Onde:

W_p : potência no enrolamento primário do transformador.

W_s : potência no enrolamento secundário do transformador.

Exemplo:

Em um transformador com potência no secundário de $30\ VA$, com tensão de $24\ V$, a seção do cobre deve ser de:

Cálculo da corrente no enrolamento secundário (i_s):

$$i_s = \frac{W_s}{v_s(t)} = \frac{30}{24} = 1,25\ A$$

Cálculo da seção de cobre no enrolamento secundário (S_s):

$$S_s = \frac{i_s}{d} = \frac{1,25}{3} = 0,41\ mm^2$$

Por tabela, sabemos que o condutor que suporta a corrente de $1,25\ A$ e tem área maior ou igual à calculada de $0,41\ mm^2$ é o fio 20 AWG, pois o próximo fio da tabela, mais fino, não atenderia ao projeto, portanto, adotamos um valor maior ou igual ao valor estimado para garantir um mínimo de $1,25\ A$ sem quedas de tensão consideráveis em regime de operação dentro da faixa de temperatura segura.

Retomando o projeto, tendo em mãos o número de espiras em cada enrolamento, sabendo-se calcular a corrente em cada bobina e, finalmente, a área em mm² de cada fio de cobre, devemos calcular a possibilidade de execução deste transformador. Para isso, iremos relacionar a área total de cobre enrolado com a área total da janela disponível em nosso núcleo, pois esta deve ser capaz de comportar o cobre enrolado mais as camadas de fitas elétricas isolantes entre as bobinas.

O cálculo do cobre total enrolado no transformador " S_{Cu} " é dado por:

$$S_{Cu} = N_1 S_p + N_2 S_s$$

Equação 42

Agora iremos calcular a área da janela " S_j ", dada por:

$$S_j = a.b = [mm^2]$$

Equação 43

Em que a é a medida da base da janela e b é a medida da altura da janela do núcleo do transformador, medidas em mm.

A possibilidade de execução é então dada por:

$$Exe = \frac{S_j}{S_{Cu}} \geq 3$$

Equação 44

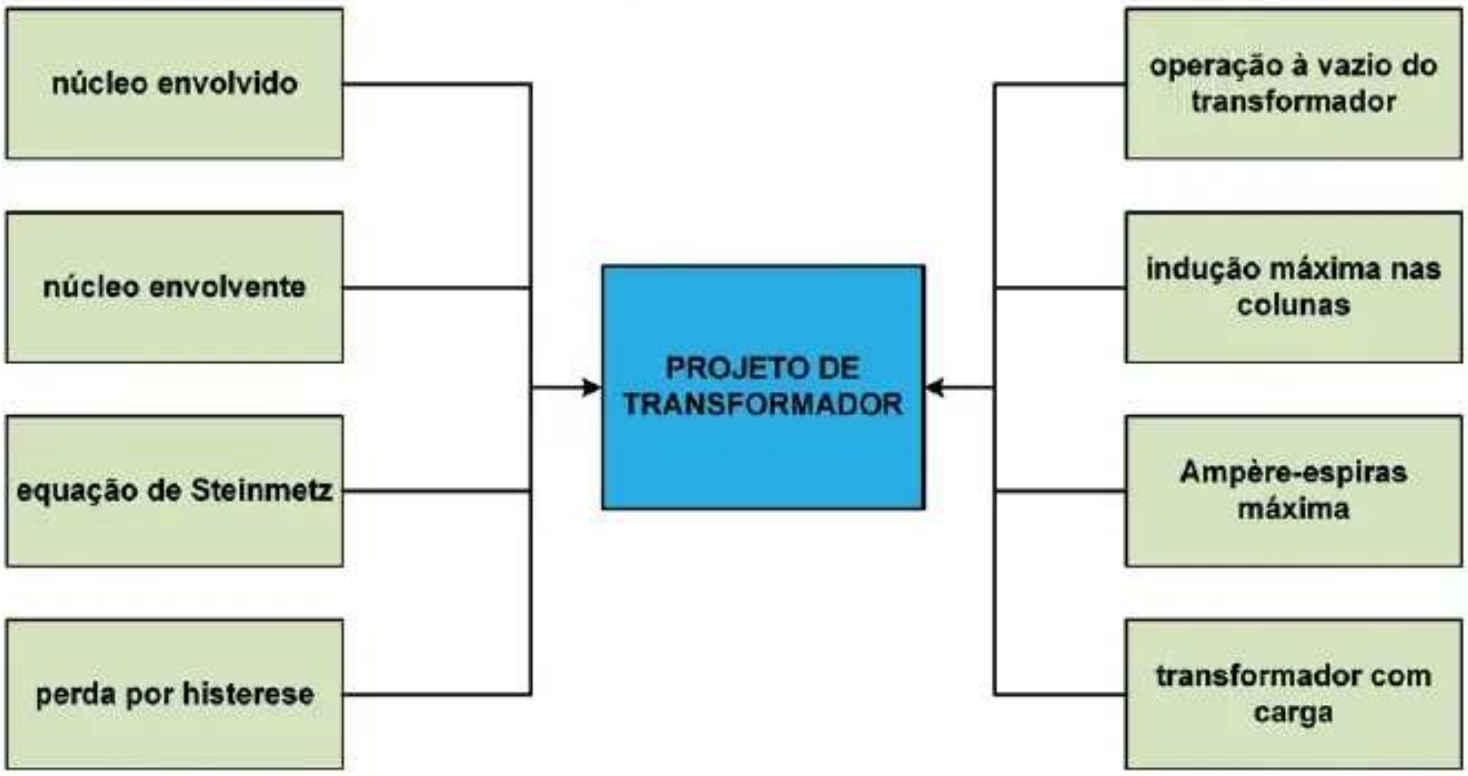
A Equação 44 nos informa que, dada a relação entre a área da janela do núcleo do transformador e a área do cobre, se o valor for maior ou igual a 3, então o transformador é executável.

O conhecimento das variáveis dimensionais de um transformador permite ao estudante projetar um transformador levando em consideração as variáveis relacionadas e sua dinâmica, além de entender o porquê da origem de constantes que se utilizam em determinadas equações e o uso de valores dados de tabela pelos fabricantes de componentes como, por exemplo, as lâminas para transformadores.

Este aprendizado concilia os assuntos previamente estudados em unidades anteriores e forma competências necessárias ao Engenheiro Eletricista para o projeto e análise de transformadores. Assim, ao projetar esta máquina elétrica, o profissional será capaz de contemplar o comportamento dela em regime dinâmico, levando em consideração as variáveis que definem seu desempenho.

Os ambientes profissionais onde o profissional Engenheiro vai aplicar este conhecimento são indústrias eletrônicas, indústrias de transformadores, empreiteiras, concessionárias de energia, empresas de manutenção elétrica e de equipamentos eletroeletrônicos.

Olá, estudante, chegamos ao final de nossa unidade e agora vamos revisitar os principais conceitos inerentes ao projeto de transformadores. Para isso, devemos analisar cada um dos termos do mapa conceitual. Após revisitar cada termo, você deve construir seu próprio mapa conceitual com as definições dadas a cada termo.



MAPA MENTAL

1. As perdas em um transformador são relevantes sob o ponto de vista de projeto e consistem em um problema a ser minimizado, pois na transferência de potência entre o primário e o secundário há variáveis importantes a serem mantidas. Com base nas perdas de um transformador, assinale a alternativa correta:

   a) As perdas por histerese são aquelas causadas pelo aquecimento dos condutores e representam valores em Ohms por metro de fio.

   b) As perdas por correntes de fuga são aquelas que ocorrem em núcleos envolventes e ramificados.

   c) Perdas por corrente parasita correspondem às correntes induzidas nas chapas de aço-silício do núcleo e são minimizadas com o uso de isolantes entre as chapas.

   d) A histerese de um transformador causa as perdas por correntes parasitas.

   e) O aquecimento no núcleo do transformador é causado pelas correntes parasitas que geram a histerese no transformador.

2. As lâminas utilizadas na fabricação de transformadores são fabricadas em materiais que podem permitir maior ou menor taxa de indução eletromagnética, conforme modelo da chapa selecionada no projeto. Com base nos dados da tabela a seguir, sobre as características da chapa de Acesita, assinale a alternativa correta:

Chapa de transformadores – Acesita: Esp. *0,35 mm*; *f = 50 Hz*						
Tipo	ω_{10}	ω_{15}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}
	W/kg	W/kg	$Gauss$	$Gauss$	$Gauss$	$Gauss$
Acesita 170 - 35	$1,51\ a\ 1,70$	$4,0\ a\ 4,2$	14.300	15.500	16.500	18.500
Acesita 160 - 35	$1,46\ a\ 1,60$	$3,6\ a\ 4,0$	14.300	15.500	16.500	18.500
Acesita 145 - 35	$1,28\ a\ 1,45$	$3,2\ a\ 3,6$	14.300	15.500	16.500	18.500
Acesita 127 - 35	$1,16\ a\ 1,27$	$2,8\ a\ 3,2$	14.300	15.500	16.500	18.500
Acesita 115 - 35	$1,04\ a\ 1,15$	$2,5\ a\ 2,8$	14.300	15.500	16.500	18.500
Acesita 100 - 35	$< 1,03$	$< 2,5$	14.300	15.500	16.500	18.500

Para frequências de $60\ Hz$, deve-se multiplicar os valores da tabela por $1,25$.

Fonte: adaptada de Martignoni (1971)

AGORA É COM VOCÊ

Fonte: adaptada de Martignoni (1971).

a) A chapa $145-35$ apresenta perda de $3{,}2\ a\ 3{,}6\ W/kg$ para uma indução eletromagnética da ordem de $15.000\ Gauss$.

b) A chapa $127-35$ apresenta perda de $3{,}2\ a\ 3{,}6\ W/kg$ para uma indução eletromagnética da ordem de $15.500\ Gauss$.

c) A chapa 100_35 apresenta perda de $4{,}0\ a\ 4{,}2\ W/kg$ para uma indução eletromagnética da ordem de $15.000\ Gauss$.

d) A chapa $115-35$ apresenta perda de $< 1{,}03\ W/kg$ para uma indução eletromagnética da ordem de $15.000\ Gauss$.

e) A chapa $160-35$ apresenta perda de $3{,}2\ a\ 3{,}6\ W/kg$ para uma indução eletromagnética da ordem de $15.800\ Gauss$.

3. Para o projeto de transformadores, é necessário levar em consideração o funcionamento a vazio e também com carga, onde o transformador apresenta comportamento distinto. Sobre a operação a vazio e com carga do transformador, assinale a alternativa correta:

a) A operação com carga consiste em acoplar cargas aos terminais do enrolamento primário do transformador.

b) Para operação a vazio, a corrente magnetizante apresenta intensidade baixa, uma vez que não há corrente no secundário do transformador, porém, para operação com carga, a corrente do enrolamento primário é mais elevada, pois produz fluxo magnético e consequentemente f.e.m.

c) A operação em vazio de um transformador consiste em uma corrente magnetizante defasada de 130° da tensão do enrolamento primário.

d) Quando o transformador assume carga, o ângulo de defasagem da corrente na saída é de 88° variando até 99° no máximo, causado pelo núcleo quadrado.

e) A operação com carga é possível quando o enrolamento secundário do transformador é associado em série com o enrolamento primário.

AGORA É COM VOCÊ

7 Introdução às Máquinas Elétricas Rotativas

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Nesta unidade, o estudante terá a oportunidade de aprender sobre as máquinas elétricas rotativas, as interações entre o eletromagnetismo e a capacidade de realização de esforço mecânico, suas limitações e noções de dimensionamento dos parâmetros que determinam o funcionamento de motores elétricos.

Imagine que você trabalha em uma empresa que fique localizada no 28º andar de um edifício e que todos os dias você tenha de subir até este pavimento para trabalhar. Quando você adentra ao elevador e aperta o botão do andar desejado, um motor elétrico faz com que as portas se fechem e, então, um outro motor, de maior porte, é acionado suavemente para que o deslocamento de subida seja iniciado e permaneça assim até o destino final, onde a poucos metros do andar final ocorre uma desaceleração de parada, também muito suave, para permitir o conforto de quem ocupa o elevador, momento em que o motor das portas é acionado novamente, abrindo-as automaticamente para que as pessoas possam sair.

Nos dias quentes, nos quais acionamos o equipamento de ar condicionado em nossas casas e empresas, um compressor é responsável por pressurizar o fluido refrigerante dentro do sistema de troca de calor, compressor este acionado por um motor elétrico, que, da mesma forma, também atua nos refrigeradores, onde armazenamos e conservamos os alimentos por conta do mesmo ciclo de refrigeração, no qual o compressor é a peça chave do processo.

Quando o frentista de um posto de combustíveis aciona a bomba para abastecer seu veículo, está fazendo uso de um motor elétrico que então movimenta partes capazes de deslocar volumes de fluido até o tanque do carro em frações de minuto com o menor esforço humano.

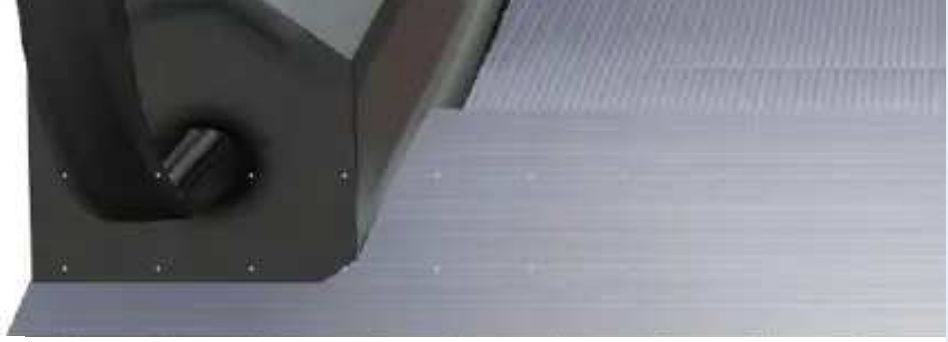
Todas essas e muitas outras operações ocorrem envolvendo máquinas elétricas, em que o motor elétrico é um elemento de destaque, mas você sabe como é possível que uma máquina elétrica produza movimento e consiga deslocar cargas, como um elevador, uma escada rolante, as partes de um compressor, por exemplo?

A capacidade de exercer esforço mecânico por meio do uso de campo magnético já era conhecida há muito tempo pela humanidade quando as primeiras amostras de magnetita foram encontradas e as propriedades de atrair metais foram avaliadas, capacidade natural de um campo magnético ininterrupto produzido pelo objeto, o mesmo efeito utilizado por muitos motores elétricos que possuem ímãs permanentes que a humanidade tem a capacidade de produzir artificialmente, além do que o efeito magnético está diretamente associado à circulação de corrente elétrica pelo condutor metálico utilizado na construção das bobinas de motores, eletroímãs, solenoides etc.

O dimensionamento dos circuitos magnéticos utilizados por máquinas elétricas rotativas é o processo que permite o entendimento das relações entre a natureza magnética e suas limitações e a realização de esforço mecânico estabelecido no eixo de uma máquina, como no caso de um motor elétrico, por exemplo.

Toda a indústria que conhecemos atualmente utiliza

toda a indústria que conhecemos atualmente utiliza



motores elétricos para acionar seus processos produtivos, em todos os segmentos, máquinas de diferentes capacidades que têm o mesmo objetivo: produzir movimento que pode deslocar cargas, transformar formas, fixar objetos de forma controlada, restringir o acesso, entre outras tarefas de suma importância para o desenvolvimento.

Nesta unidade, iremos estudar o comportamento de máquinas elétricas que utilizam a conversão eletromecânica de energia para realização de movimento em partes móveis, como no caso de motores elétricos em suas diversas aplicações.

Como sabemos, os motores elétricos são fundamentais para o progresso e o desenvolvimento da indústria, além de permitir que o conforto de nossos lares possa ser preservado, mantendo-se sempre ativos os sistemas em funcionamento, como no caso de refrigeradores e sistemas de ar condicionado.

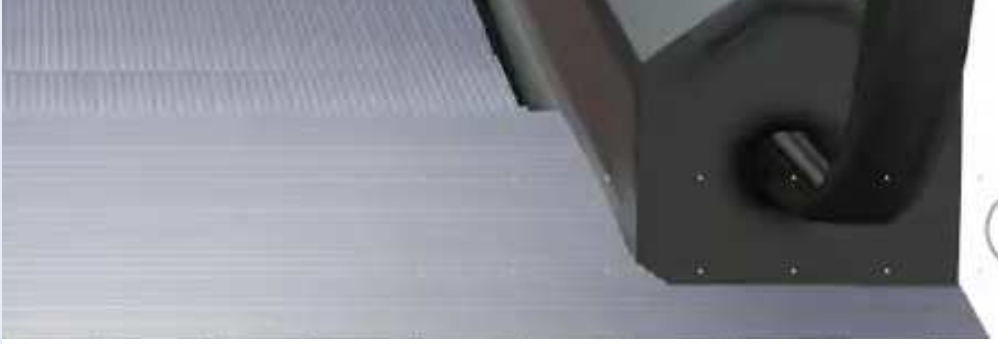
Pensando nos motores utilizados em tantas aplicações importantes, você estudante irá realizar uma tarefa voltada à sustentabilidade e viabilidade do uso desse recurso, levantando 5 tipos de máquinas elétricas que utilizam motores e relacionando seus parâmetros, de acordo com os dados informados pelas placas de identificação fornecidas pelos fabricantes.

Os pontos mais importantes a relacionar são a potência consumida em regime pleno de utilização, o rendimento do motor elétrico, o tempo médio de utilização diário e mensal acumulado do equipamento e o tempo de vida útil dele.

Relacione cada parâmetro em uma tabela para cruzamento de dados e posterior análise.

Após o levantamento dos equipamentos com motores elétricos, você deverá calcular o custo que representa o consumo de energia elétrica em cada caso, associado ao seu rendimento e concluindo o quanto cada equipamento é necessário em seu uso, uma vez que se ele apresenta rendimento de 80%, por exemplo, de um total de 100% da energia consumida da rede, 20% são dissipados na natureza e apenas 80% são convertidos em energia útil, como o movimento de um eixo, no caso de motores elétricos.

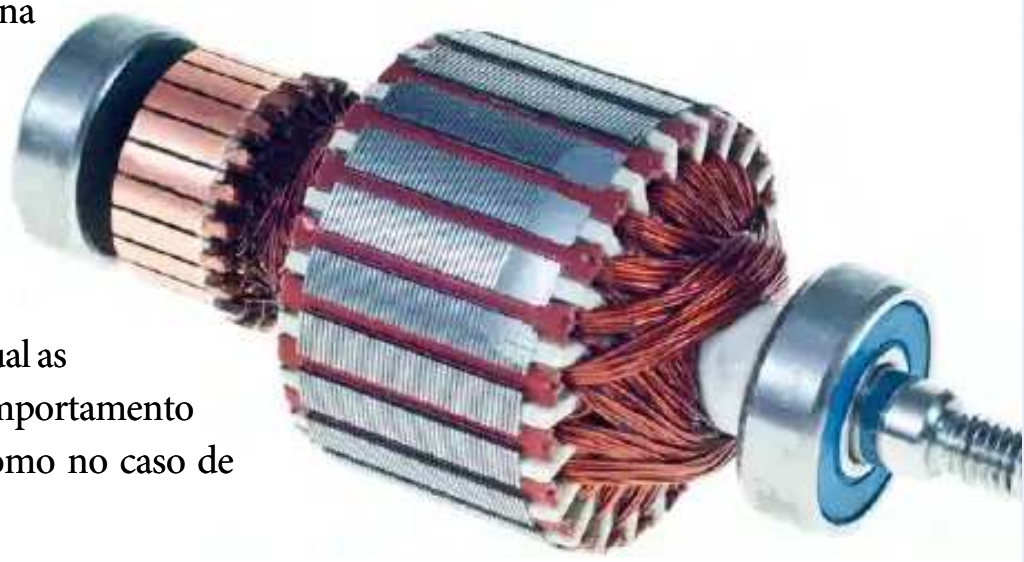
Não se esqueça de que, ao conectar uma máquina elétrica na tomada, ela consome 100% da potência e transfere para seu eixo apenas parte deste total, porém você irá pagar pelo total, logo, ao estimar parâmetros de sustentabilidade, estamos minimizando desperdícios e prejuízos, uma vez que, quando observamos esses detalhes em casa, replicamos em nosso trabalho, melhorando a eficiência energética pelo uso responsável da



energia elétrica.

DIÁRIO DE BORDO

As **máquinas de campo girante**, conhecidas como **máquinas de indução**, ou mesmo as **máquinas síncronas** atuam com **campo girante no entreferro** e, então, operam com corrente e tensão alternadas em seus estatores e rotores, onde, em uma máquina síncrona, o estator é alimentado com corrente alternada enquanto o rotor, com corrente contínua. Um exemplo disso é em aplicações de **geradores de energia elétrica**.



Quando nos referimos às máquinas com várias fases, podemos dizer que esta máquina é polifásica e, portanto, possui comportamento no qual as forças magnetomotrizes (f.m.m.s) apresentam comportamento aproximadamente senoidal em seu entreferro, como no caso de motores de indução trifásicos, por exemplo.

Figura 1 - Motor de indução trifásico em vista explodida

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação tridimensional de um motor de indução trifásico onde é possível ver, da periferia da imagem para seu centro, as tampas laterais, mais a dentro e à esquerda o rotor do tipo "gaiola de esquilo" com seus rolamentos fixados ao eixo, um pouco à direita o estator e a carcaça do motor com pedestal, pouco mais à direita temos a unidade de ventilação e tampa interna com sede para o rolamento direito.

Já nas máquinas síncronas, ao excitarmos o rotor com corrente contínua, provocamos o surgimento de f.m.m.s estacionárias com relação ao rotor, mesmo sendo girantes com relação ao estator dado ao movimento do eixo por ação externa.

"Máquinas síncronas produzem torque médio não nulo quando suas ondas de força magnetomotriz girantes são estacionárias entre si".
Fonte: Bim (2012, p. 163).

Ao projetar máquinas girantes, há a preocupação em produzir o movimento decorrente da força impressa pelo campo magnético em um eixo de forma uniforme, para que ele possa reproduzir o movimento continuamente, assim, faz-se necessário que a disposição dos enrolamentos ocorra em geometria que distribua o fluxo de forma regular em toda a superfície do entreferro para que a transferência de potência seja dada o mais próximo possível de uma senoide.

Quando nos referimos à geração de energia, a máquina síncrona é aquela que irá fornecer as tensões em seus terminais na medida em que o fluxo girante do rotor corta os condutores do estator ao longo de seu movimento angular dado pelo movimento do eixo, assim, a produção de sinais senoidais está associada à qualidade da montagem e distribuição dos enrolamentos no estator e no rotor da máquina.

As **máquinas de indução polifásicas** quando associadas **às** fontes de tensão polifásicas produzem campo magnético girante em torno dos enrolamentos percorridos pela corrente circulante, de velocidade síncrona, dada em função do número de pares de polos (p) do enrolamento e da frequência (f) do sinal.

O campo magnético produzido no estator induz f.e.m. no rotor que consequentemente impulsiona correntes em seus condutores, estes que consequentemente causam o surgimento de outro campo magnético com f.m.m. que interage com a f.m.m. do estator.

A velocidade síncrona do estator **é dada pelo símbolo "** ω_s **"**, enquanto que a velocidade do rotor é dada pelo símbolo "ω_r". A velocidade relativa entre essas duas componentes determina a frequência elétrica da tensão induzida no rotor, assim, não é possível que uma máquina de indução funcione em velocidade síncrona, pois esta atua com indução de tensões no rotor.

As máquinas de indução possuem estator cilíndrico com ranhuras nas paredes internas, onde são alocados os laços de bobinas distribuídas de modo que cada fase aplicada produza fluxo magnético que se propague uniformemente ao redor de todo o estator, não apresentando, assim, um enrolamento de campo específico.

Nessas máquinas, o rotor normalmente é composto de condutores que podem ser dados no formato de bobinas enroladas em ranhuras ou então por meio de barras de metal (normalmente alumínio ou de cobre em máquinas de grande porte) interligadas entre si em curto-circuito por meio de placas laterais, formando um cilindro conhecido como "**gaiola de esquilo**". Este último é o mais frequentemente utilizado para os motores elétricos de indução trifásicos que o mercado utiliza, apresentando cobertura de mais de 90% em termos de aplicação industrial comparado aos demais tipos de motores.

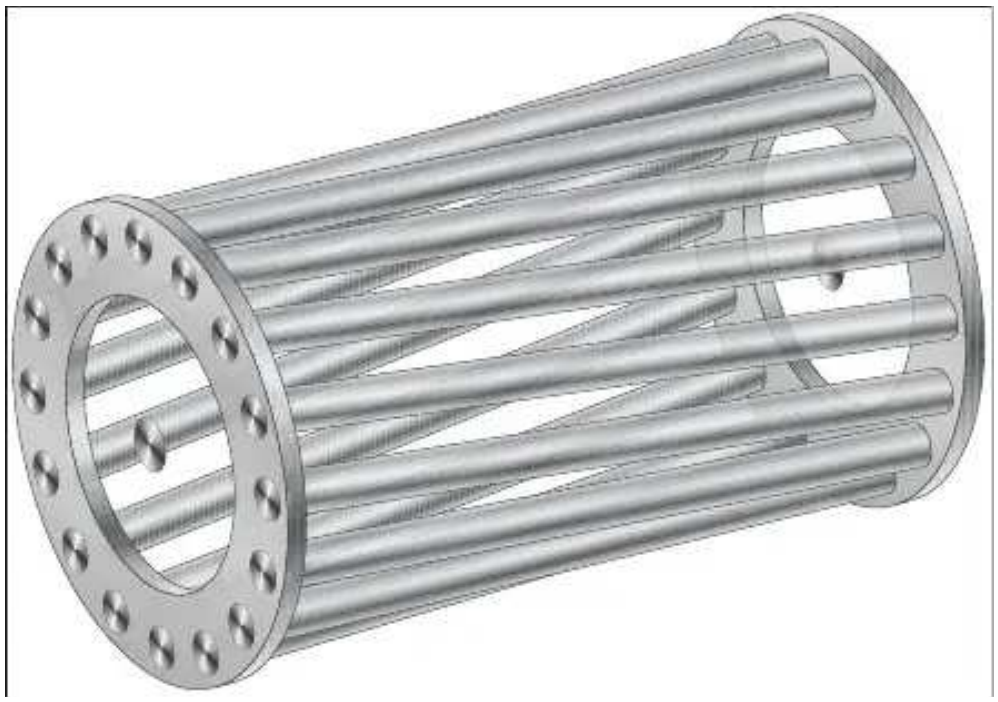


Figura 2 - Rotor do tipo "gaiola de esquilo" - condutores em curto-circuito

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma representação do rotor conhecido como "gaiola de esquilo" do inglês "squirrel cage motor rotor", que apresenta duas placas circulares de metal nas laterais que interligam os condutores e formam um cilindro.

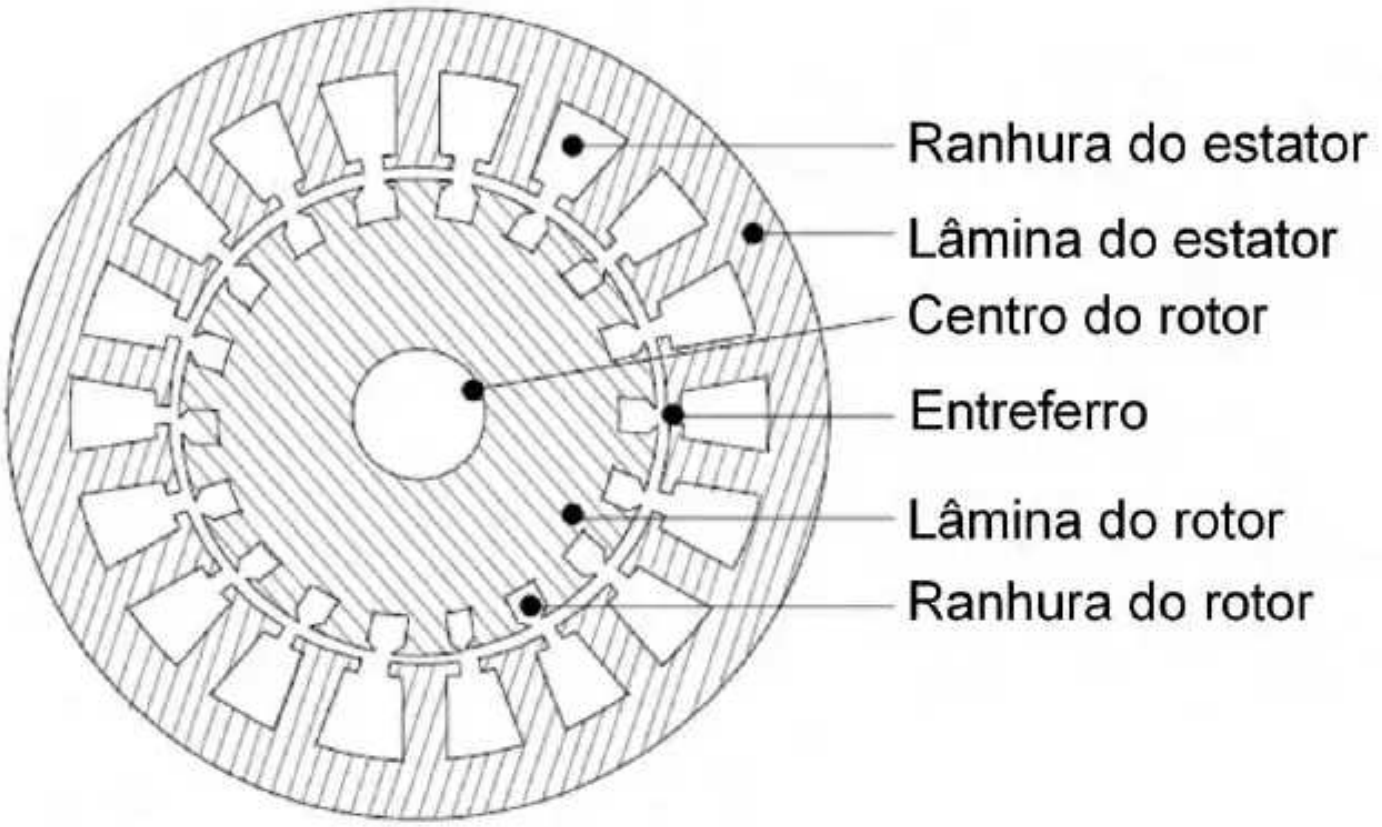
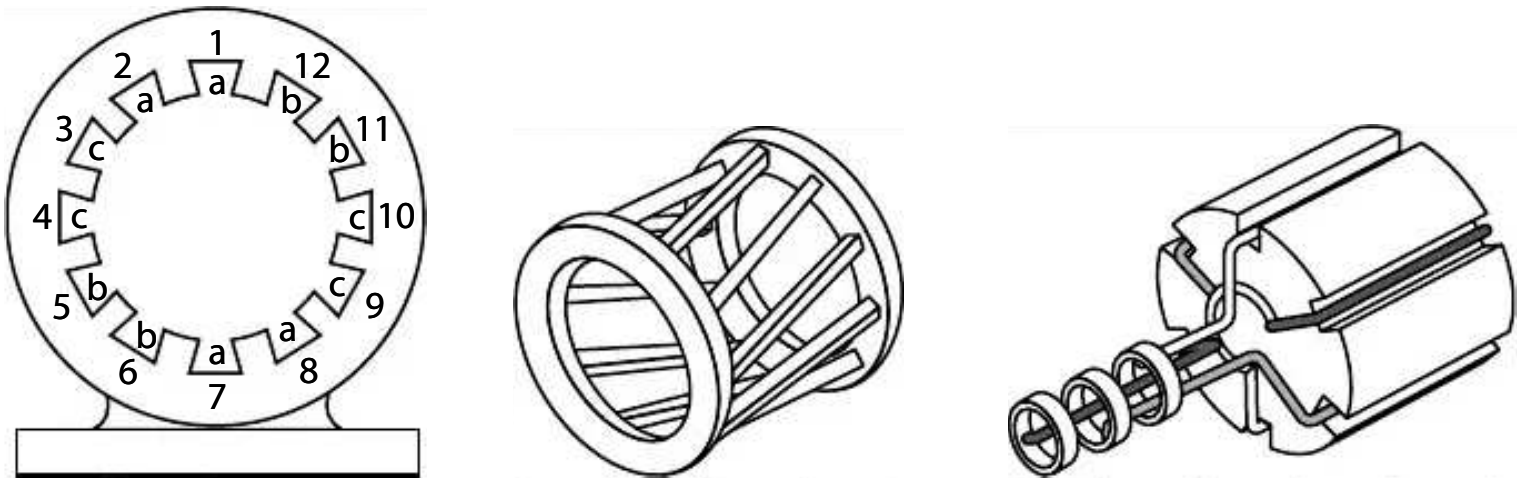


Figura 3 - Lâminas do estator e do rotor de um motor / Fonte: adaptada de Barnes (2003).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação das chapas utilizadas para a composição do estator e do rotor de um motor elétrico. Podemos observar através da figura os itens: rotor e estator, além de seus elementos construtivos como Ranhura do estator, Lâmina do estator, Centro do rotor, Entreferro, Lâmina do rotor e Ranhura do rotor.

Quando o **motor de indução** possui **rotor bobinado**, os condutores das bobinas são ligados a anéis que estão fixados ao eixo, de modo que, para serem excitados, há a introdução de corrente através de escovas que conduzem as tensões das fases para o rotor diretamente nesses anéis, de modo a permitir que a velocidade e o torque sejam controlados diretamente, manipulando-se a corrente de excitação do rotor por meio de resistências ou reostatos. A Figura 3 mostra uma representação de lâminas utilizadas na construção de um motor com rotor bobinado, onde é possível identificar as ranhuras onde as bobinas são alocadas (tanto no rotor quando no estator).

Na Figura 4, temos as três representações geométricas que permitem identificar em (a) o perfil de um estator com suas 12 ranhuras, sendo que a identificação de cada uma das fases ocorre de modo intercalado para que a distribuição das linhas de campo seja uniforme. Além disso, em (b) temos a representação de um rotor utilizado em motores do tipo gaiola de esquilo, onde podemos observar as placas laterais interligando os condutores em curto-circuito, já em (c) temos a representação de um rotor bobinado com seus anéis inseridos ao longo de seu eixo. Note neste último que os condutores são enrolados no rotor e seus terminais (extremidades) são fixados nos anéis que dão contato aos potenciais a serem utilizadas para excitar suas bobinas.



(a) Estator trifásico de camada simples

(b) Rotor gaiola de esquilo

(c) Rotor bobinado trifásico

Figura 4 - Geometria de estatores utilizados em máquinas de indução / Fonte: Bim (2012, p. 164).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta três representações geométricas para estator e rotor de máquinas elétricas. Na primeira representação, temos uma imagem em corte do perfil de um estator com suas 12 ranhuras e a identificação de cada uma das fases, na segunda temos a representação de um rotor utilizado em motores do tipo gaiola de esquilo e na terceira representação temos um rotor bobinado com seus anéis inseridos ao longo do eixo.

Nas imagens dadas na Figura 5, temos exemplos de rotor bobinado (a) e rotor do tipo gaiola de esquilo (b).

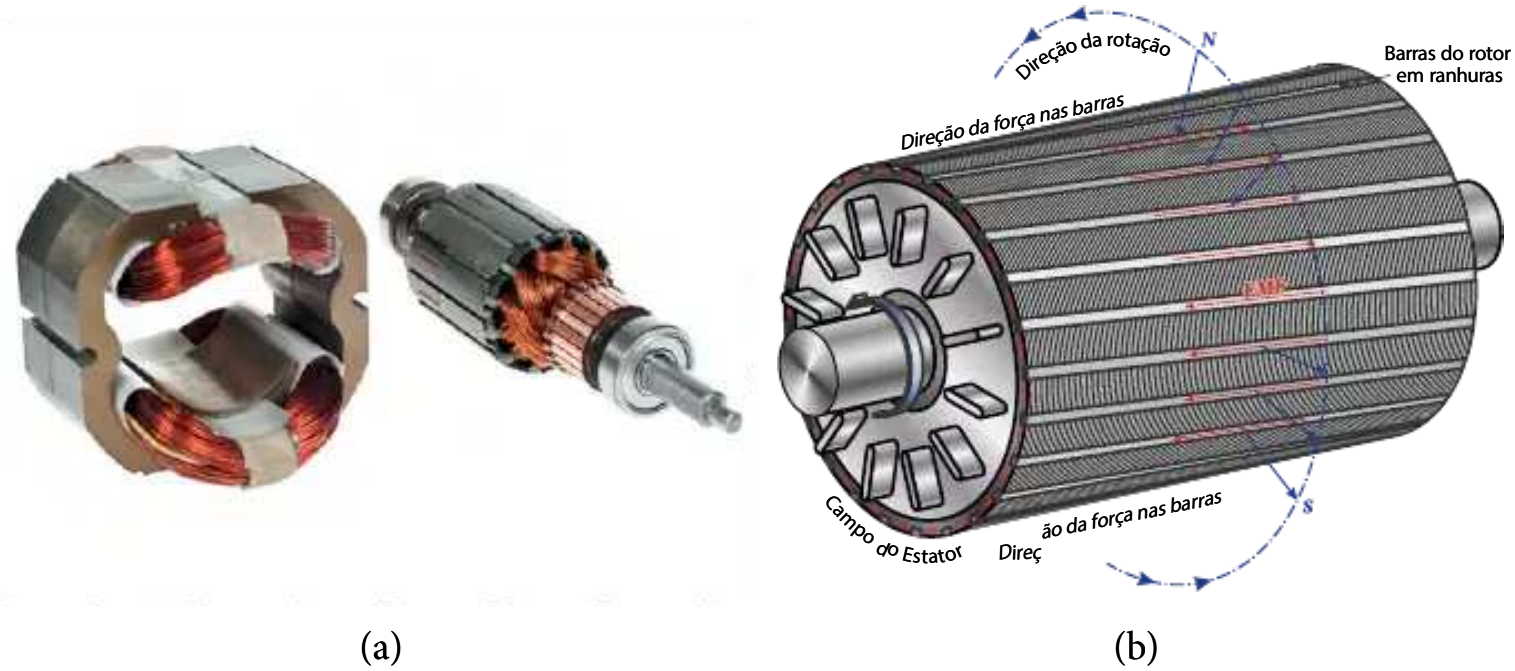


Figura 5 - Rotores de motores elétricos: (a) rotor bobinado e (b) rotor do tipo gaiola de esquilo

Descrição da Imagem: esta figura mostra dois exemplos de rotores, sendo o primeiro (a) uma foto de um motor de rotor bobinado desmontado com seu estator ao lado esquerdo e o rotor do lado direito. Já em (b) temos um desenho de um rotor do tipo gaiola de esquilo, que permite então a visualização dos parâmetros funcionais da direção da força nas barras condutoras, direção da rotação, barras do rotor em ranhuras e o campo do estator.

Os motores de rotor bobinado, também conhecidos como "motores de anéis", podem possuir fonte de alimentação externa para a excitação dos indutores do rotor e assim obter o controle de velocidade e torque em lugar dos reostatos, sendo, neste caso, conhecidos como máquinas de indução duplamente alimentadas.

Fonte: adaptado de Bim (2012).

Para o motor com rotor do tipo gaiola de esquilo, não há acesso aos condutores por meio de anéis, assim temos as correntes que circulam pelos condutores sendo induzidas pelo fluxo produzido no estator percorrido pelas correntes das fases ligadas aos seus enrolamentos. Este tipo de motor tem o número de polos do rotor igual ao número de polos do estator. Além disso, o número de fases "m_r" é igual ao número de barras de metal do estator ou de suas ranhuras, sendo que a defasagem da corrente é dada por $2\pi/m_r$, em que cada fase ocupa $1/2$ espira ou um condutor.

Com o objetivo de se evitar o surgimento de conjugado de relutância entre o estator e o rotor da máquina de indução, os condutores do rotor são dispostos em ranhuras de número diferente das ranhuras do estator e inclinadas em relação a essas, de modo que haja a diminuição das harmônicas espaciais de força magnetomotriz formadas pela abertura das ranhuras e também do torque pulsante. Desta maneira, evita-se que o fluxo magnético ocorra em caminhos definidos apenas pelos dentes ou pelas ranhuras.

REALIDADE AUMENTADA

Motor de Indução Assíncrono Trifásico

Olá, estudante! Convido você para participar de nosso Podcast, em que iremos falar a respeito dos motores de indução assíncronos trifásicos, seus princípios de funcionamento e aplicações.

Nas **máquinas síncronas,** os enrolamentos do estator são semelhantes aos enrolamentos utilizados nas máquinas de indução, porém a geometria do rotor se diferencia, dado que na máquina de indução o rotor é cilíndrico e conta com enrolamentos polifásicos, já na máquina síncrona, o rotor pode ser de polos lisos ou de polos salientes.

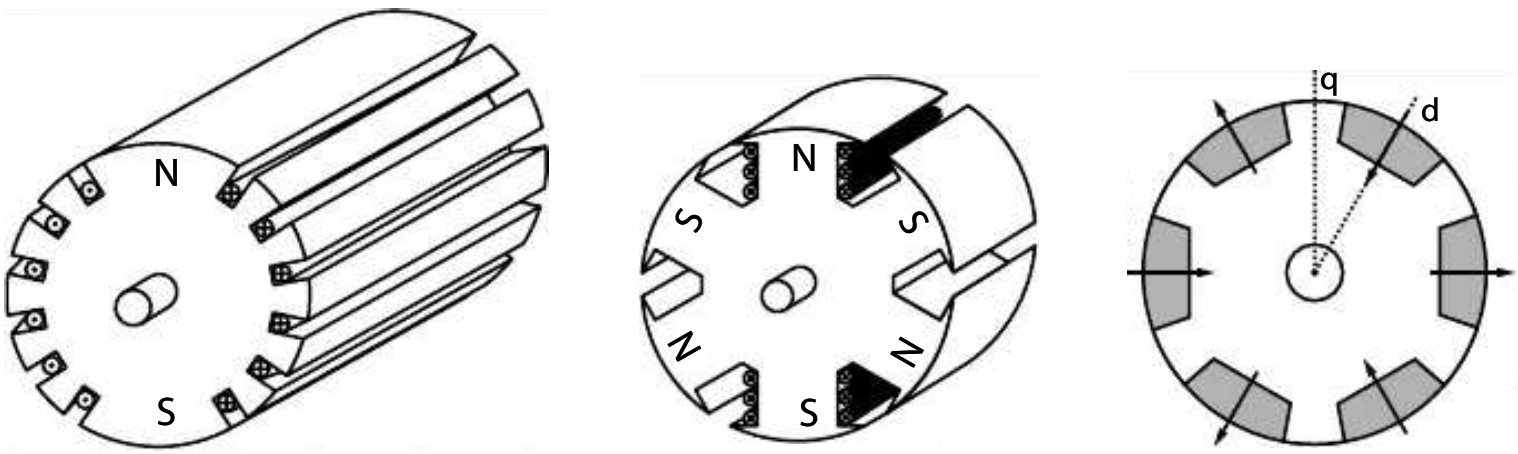
O **rotor de polos lisos** apresenta um enrolamento distribuído, enquanto o **rotor de polos salientes** apresenta enrolamento concentrado, em ambos os casos, podendo ou não serem excitados por fonte de tensão externa, pois há casos em que a máquina síncrona conta com ímãs permanentes fixados em seu rotor.

Pelo fato do fluxo magnético ser estacionário com relação ao rotor, nas máquinas síncronas o torque só se desenvolve quando a velocidade do rotor é a mesma que a velocidade síncrona.

só se desenvolve quando a velocidade do rotor é a mesma que a velocidade síncrona.

As máquinas com rotor de polos lisos possuem o entreferro constante, sendo sua velocidade de giro da ordem de 1200 a 3600 *rpm* normalmente aplicados nos turbogeradores, sendo **o diâmetro do rotor** " D_r " inferior ao seu comprimento axial " L_r " (BIM, 2012).

Quando a máquina atua com baixas velocidades, então a solução é o motor de polos salientes, como, por exemplo, **máquinas utilizadas em** hidrogeradores. Este tipo de máquina exige um número grande de polos, resultando em grandes diâmetros de rotores com relação ao seu comprimento axial (relação D_r/L_r), dado que há grande quantidade de peças polares para serem alocadas em sua estrutura.



(a) Polos lisos (b) Polos salientes (c) Rotor com ímãs

Figura 6 - Configurações de rotores utilizados em máquinas síncronas / Fonte: Bim (2012, p. 166).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta três representações de rotores utilizados em máquinas síncronas, onde podemos observar, na primeira, o modelo de polos lisos com seus condutores dispostos na superfície do rotor, na segunda, temos a distribuição dos condutores com entreferro variável no tipo polos salientes e, na terceira, temos uma representação do tipo de rotor com ímãs.

Podemos verificar a partir da Tabela 1 os valores de potência aparente nominal dados em MVA, e o número de polos, entreferro mínimo " g_m ", massa " M_r " do rotor e sua inércia " J_r " para alguns casos de rotores de polos salientes.

MVA nominal	10,1	11,2	225	245	472,6
Polos	12	30	80	36	60
$g_m\ (mm)$	13	11	18	20	27
$D_r\ (mm)$	1844	3428	14464	7360	12446
$L_r\ (mm)$	600	560	1320	2350	3000
$M_r\ (t)$	22	61	504	401	932
$J_r\ (t.m^2)$	6,75	70	19000	14800	26665
D_r/L_r	3,9	6,8	11,5	3,46	4,4

Tabela 1 - Dimensões de rotores de polos salientes / Fonte: adaptada de Bim (2012).

No caso das máquinas com rotor de polos lisos, temos alguns dados dimensionais que podem ser analisados na Tabela 2.

MVA nominal	24	49	188,24
Polos	2	2	2
$g_m\ (mm)$	28	32,5	65
$D_r\ (mm)$	750	800	1000
$L_r\ (mm)$	2000	3000	3500
$M_r\ (t)$	0	0	0
$J_r\ (t.m^2)$	750	800	1000
D_r/L_r	0,375	0,257	0,286

Tabela 2 - Dimensões para rotores de polos lisos / Fonte: adaptada de Bim (2012).

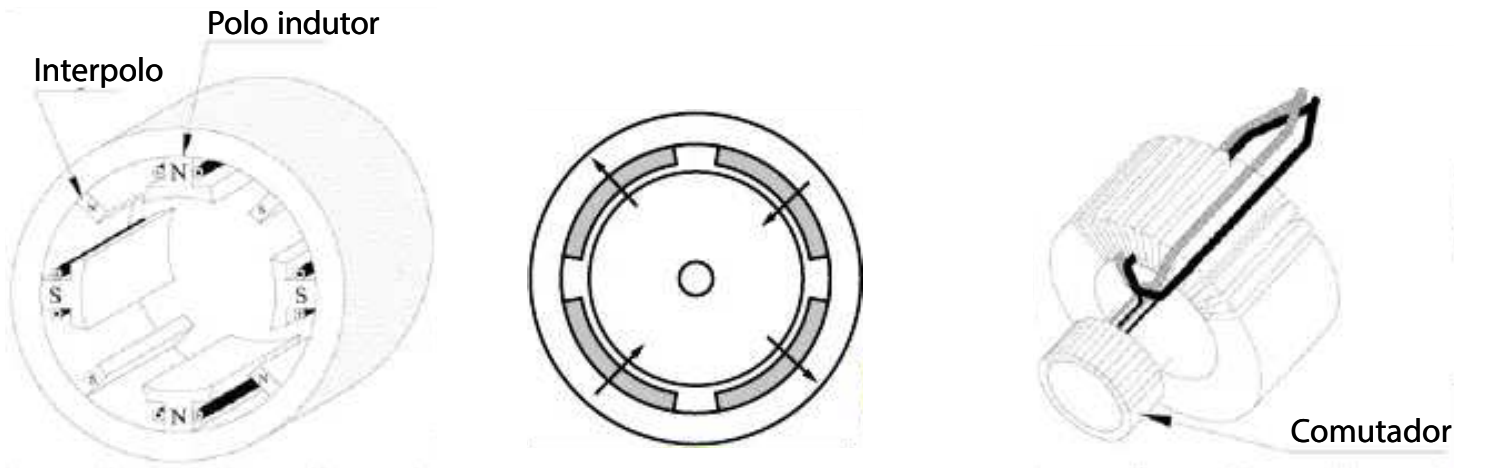
Nas máquinas com rotor de polos lisos, na medida em que a potência nominal da máquina aumenta, a relação entre diâmetro e comprimento axial (D_r/L_r) diminui, assumindo valores abaixo do valor unitário (1).

As máquinas de corrente contínua apresentam duas partes principais que se distinguem como:

- o estator que aloja os polos indutores, auxiliares e enrolamentos compensadores.
- o rotor que aloja as bobinas relacionadas à conversão de energia e lâminas do comutador.

Os **polos indutores**, mostrados na representação da Figura 7 (a), recebem esta denominação porque são responsáveis por induzir as tensões nas bobinas do rotor. Sua geometria é a mesma utilizada em máquinas de polos salientes, podendo apresentar bobinas que são utilizadas para o **campo indutor** ou ímãs permanentes. Esta arquitetura pode ser observada na Figura 7 (b).

Com geometria cilíndrica, o rotor possui ranhuras que alojam os enrolamentos de armadura, de acordo com a Figura 7 (c), onde é possível observar um componente denominado "**comutador**", que consiste em um conjunto de barras de cobre isoladas e montadas separadamente da armadura, com a função de estabelecer a conexão elétrica entre os terminais da armadura (externos e internos).



(a) Fluxo indutor dado por bobinas excitadas

(b) Fluxo indutor dado por ímãs permanentes

(c) Armadura com enrolamento parcial e comutador

Figura 7 - Configuração das máquinas de corrente contínua / Fonte: Bim (2012, p. 168).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta três representações dadas para configurações de máquinas de corrente contínua, sendo a primeira representando o fluxo indutor dado por bobinas excitadas, identificando o interpolo e o polo indutor. Na segunda, temos a representação em corte de um motor de corrente contínua onde setas indicam o sentido do fluxo magnético dado por ímãs permanentes. Na terceira representação, temos um rotor e a identificação de sua armadura e enrolamento parcial e seu comutador.

"É no enrolamento de armadura que é induzida a tensão elétrica associada à conversão".
Fonte: Bim (2012, p. 167).

Os **interpolos** (também conhecidos como polos auxiliares) são estruturas fixadas entre os polos indutores e têm o objetivo de anular o campo magnético que possa vir a surgir na região interpolar causada pela corrente de armadura, sendo, portanto, conectados em série com esta. É possível observar em detalhes a representação desta estrutura na Figura 7 (a).

O **fluxo magnético indutor** é produzido a partir da circulação de corrente elétrica nas bobinas do **enrolamento de campo**, já no caso onde utiliza-se ímãs permanentes, as peças polares são fabricadas em material dotado de propriedades magnéticas permanentes.

Para a construção de máquinas elétricas, normalmente iremos observar a presença de bobinas acomodadas em material magnético, onde, quando percorridas por corrente elétrica, causam o aumento de intensidade de campo magnético $\overline{H}$. Para relacionar a corrente geradora e o consequente vetor campo magnético $\overline{H}$, recorremos à lei de Ampère, onde em um dado circuito fechado, a circulação

campo magnético H, recorremos à lei de Ampère, onde em um dado circuito fechado, a circulação do campo é igual à soma algébrica das correntes que circulam pela superfície deste percurso.

A força magnetomotriz, por sua vez, é a soma algébrica das correntes que são necessárias para gerar campo magnético $\overline{H}$, sendo que em aplicações onde não há emissão radiada de campo magnético, podemos afirmar que a $f.m.m.$ é dada por:

$$f.m.m. = \oint_C \overline{H}.\bar{dl} = \sum i \ \textit{ampère-espira}$$

Equação 1

Por conta do produto entre os dois fatores na integral dada pela Equação 1, devemos assumir $\overline{H}$ na direção de $\bar{dl}$ que é o fasor comprimento dado na direção da trajetória.

Vamos considerar o caso de uma máquina elétrica de indução onde o entreferro é constante e aloja apenas dois polos em suas ranhuras de uma única bobina, sendo seus lados deslocados a uma distância de π radianos (equivalente a $180°$), conforme podemos observar a partir da Figura 8.

Em nosso exemplo, iremos adotar o estator de uma máquina de indução de dois polos com ranhura alojando enrolamento de bobina única, estando os lados da bobina dispostos a uma distância de π radianos entre si, conforme podemos observar na Figura 8 (a). Essa bobina enrolada com o dado espaçamento configura o que conhecemos como "**bobina de passo pleno**" e o fato deste enrolamento ter apenas uma bobina denominamos de "**enrolamento concentrado**".

É importante salientar que cada par de polos possui N espiras, logo, cada polo possui então $N/2$ espiras que é excitada pela corrente $i_s(t)$ conforme mostrado na Figura 8 (a), onde as linhas que saem do estator correspondem ao polo Norte e as linhas que entram no estator o polo Sul.

Observe na Figura 8 (a) que a forma circular do corte do conjunto rotor-estator é traduzida mais abaixo pela relação linear com as linhas de campo fluindo entre o estator e o rotor e vice-versa.

"Considera-se que o campo magnético necessário para magnetizar o material magnético utilizado no estator e no rotor seja desprezível em relação ao exigido no entreferro, o que significa que os campos magnéticos no ferro podem ser considerados nulos".
Fonte: Bim (2012, p. 168-169).

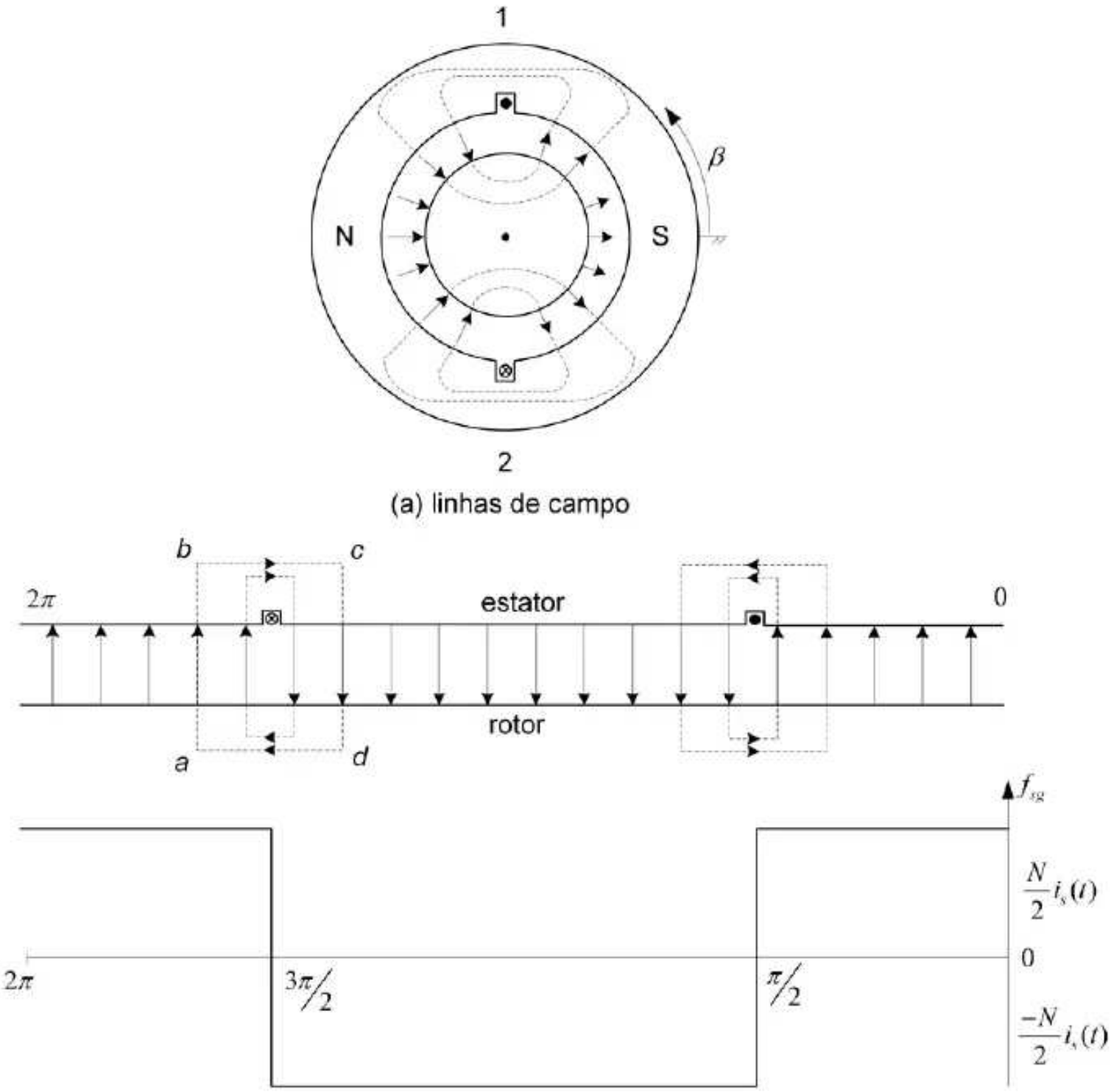


Figura 8 - Linhas de campo magnético f.m.m. / Fonte: adaptada de Bim (2012).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta a representação em corte de uma máquina elétrica de entreferro constante, onde as linhas de campo são indicadas de acordo com as regiões em torno do rotor entre a entrada e a saída do fluxo de corrente (1 e 2, respectivamente) e a definição dos polos magnéticos N e S. Mais abaixo a representação dos sentidos das linhas de acordo com o ângulo variando entre 0 e 2π .

Como resultado, podemos deduzir que a força magnetomotriz total é calculada pela soma das integrais das regiões dadas entre os limites "a" e "b" e dos limites de integração "c" e "d", tomando-se um percurso em que a $f.m.m.$ possua o mesmo sentido entre a trajetória e a linha de campo (para valores positivos de $f.m.m.$), uma vez que as linhas de campo são consideradas uniformes e radiais, pois na maioria dos casos o entreferro possui dimensões inferiores às do passo polar. Assim, o cálculo da $f.m.m.$ fica:

$$f.m.m. = \int_a^b \overline{H}_g(t).d\bar{l} + \int_c^d \overline{H}_g(t).d\bar{l}$$

Equação 2

De tal forma que, considerando-se a simetria entre as grandezas $H_{ab} = H_{cd}$, podemos afirmar que o campo magnético total "$H_g(\beta)$" gerado em cada entreferro por conta da excitação da bobina pela corrente $i_s(t)$, contendo N espiras é:

$$H_g(\beta) = \frac{1}{g}.f_{sg}$$

Equação 3

Sendo que:

$$f_{sg} = \frac{N}{2} i_s(t) \qquad ampère - espira \ \ por \ \ entreferro$$

Equação 4

Em que f_{sg} é a força magnetomotriz necessária para magnetizar o entreferro.

Assume-se que, para a construção de máquinas de corrente contínua, o rotor ofereça quatro principais funções (KOSOW, 2005):

1. permitir a ação motora mecânica;
2. prover chaveamento para a comutação;
3. reunir os condutores indutores de tensão e de torque eletromagnético; e
4. representar baixa relutância para o fluxo.

A Figura 9 mostra a representação de um motor CC e sua construção dada pelos elementos e circuitos responsáveis pelo seu funcionamento.

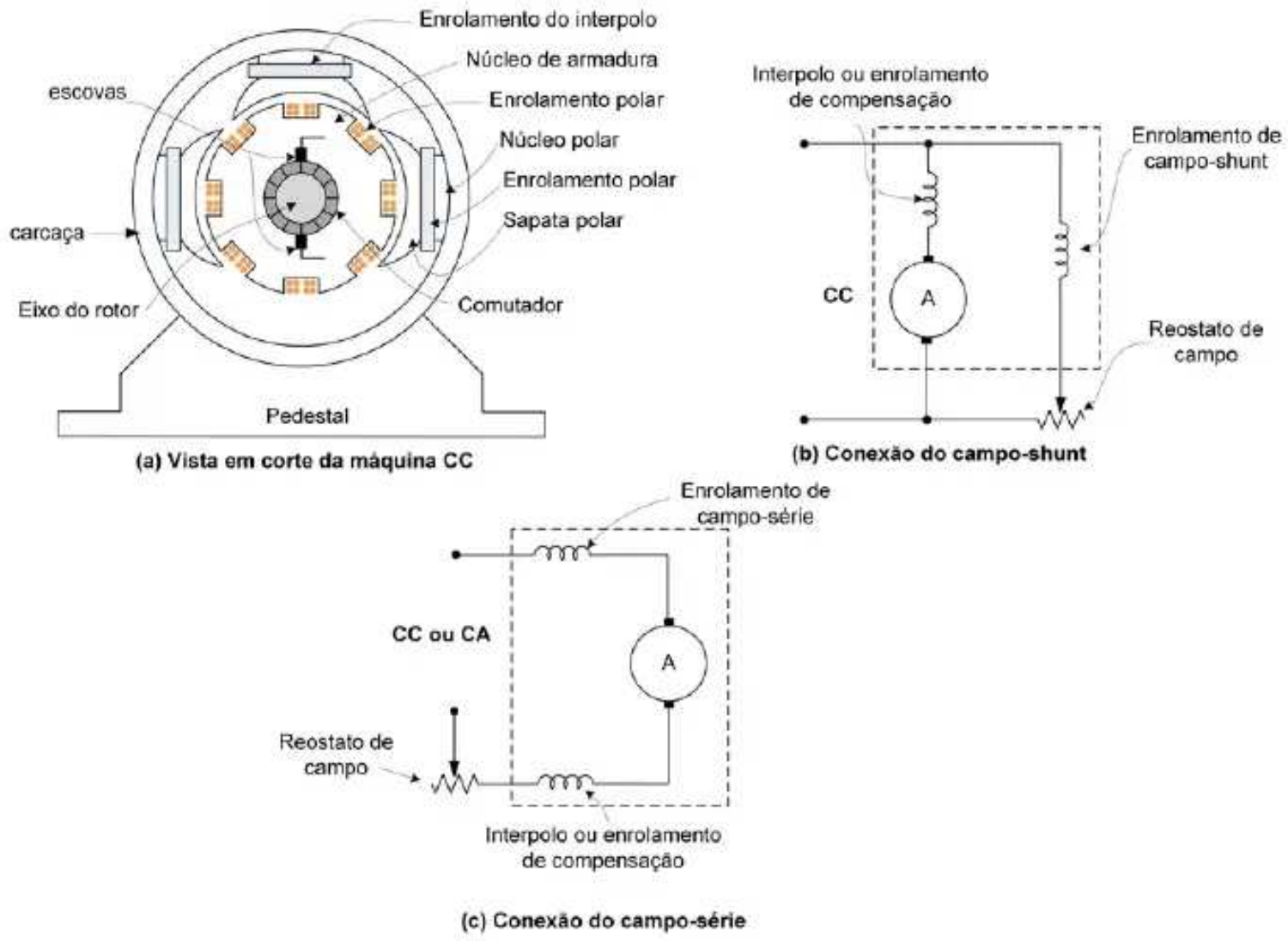


Figura 9 - Elementos de construção de uma máquina CC / Fonte: adaptada de Kosow (2005).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação dos elementos de montagem de uma máquina CC, onde podemos ver em detalhes a carcaça, as escovas, o eixo, o comutador do rotor, o enrolamento do interpolo, o núcleo de armadura, o enrolamento polar, o núcleo polar, o enrolamento polar, a sapata polar e o pedestal do motor elétrico de corrente contínua.

Podemos observar a partir da Figura 9 que apresenta a **carcaça do motor**, que pode ser fabricada em ferro fundido na maioria dos casos, podendo também ter sua estrutura laminada. A carcaça tem a forma cilíndrica e possui o objetivo de suportar mecanicamente todo o conjunto da máquina, além de prever retorno magnético para o fluxo produzido em seu interior pelos enrolamentos de campo, que atuam diretamente com o campo série (com poucas espiras de fio grosso) e com o campo-shunt, com muitas espiras de fio fino.

Os **polos** (que suportam os enrolamentos de campo) são fabricados em ferro laminado e são fixados por meio de parafusos ou soldagem na carcaça, depois de inseridos os enrolamentos de campo em seu interior. **Já a sapata polar** apresenta curvatura adequada ao espalhamento do fluxo, dado que sua extensão é maior do que a do núcleo polar.

Temos também o **interpolo**, que se encontra na região interpolar, fixado na carcaça da máquina CC, em posição intermediária entre os polos principais, sendo na maioria dos casos menores do que estes, e sua bobina possui poucas espiras de fio grosso ligada em série com o **circuito da armadura**, cuja corrente circulante determina a f.m.m.

Fixados na **sapata polar** por meio de ranhuras axiais, temos os **enrolamentos de compensação**, que são opcionais em algumas máquinas CC e possuem o sistema de fixação semelhante ao utilizado nos enrolamentos do interpolo.

Assim como o interpolo e os enrolamentos de compensação, as **escovas** (fabricadas em grafito) e os **anéis-suporte** de escova compõem o circuito da armadura, onde no estator há um suporte para alojar as escovas que são mantidas por molas dentro deste compartimento que as comprime firmemente contra o comutador localizado no rotor da máquina. As escovas são interligadas à bobina da zona interpolar e a um segmento do comutador.

É importante salientar que na carcaça de máquinas deste tipo normalmente são fixados os mancais que alojam os rolamentos para a sustentação mecânica do eixo do rotor, além dos anéis-suporte e suporte de escovas (para alguns modelos de motores).

Já o acesso às conexões elétricas das máquinas CC pode ser observado na Figura 9 (b) e (c), em que temos em (b) a conexão do ***campo-shunt***, onde os enrolamentos de campo estão em paralelo com o circuito da armadura, que normalmente é composto de um enrolamento, enquanto, na Figura 9 (c), temos a conexão do **campo-série**, que conta com poucas espiras de fio grosso. Este enrolamento está ligado em série com o circuito da armadura e fica localizado próximo aos polos principais.

As máquinas elétricas rotativas podem ser representadas por diversas classes, onde as principais são os motores, geradores e alternadores. Para ilustrar nosso estudo, analisemos a Figura 10, onde a classificação da maioria dos motores elétricos é apresentada.

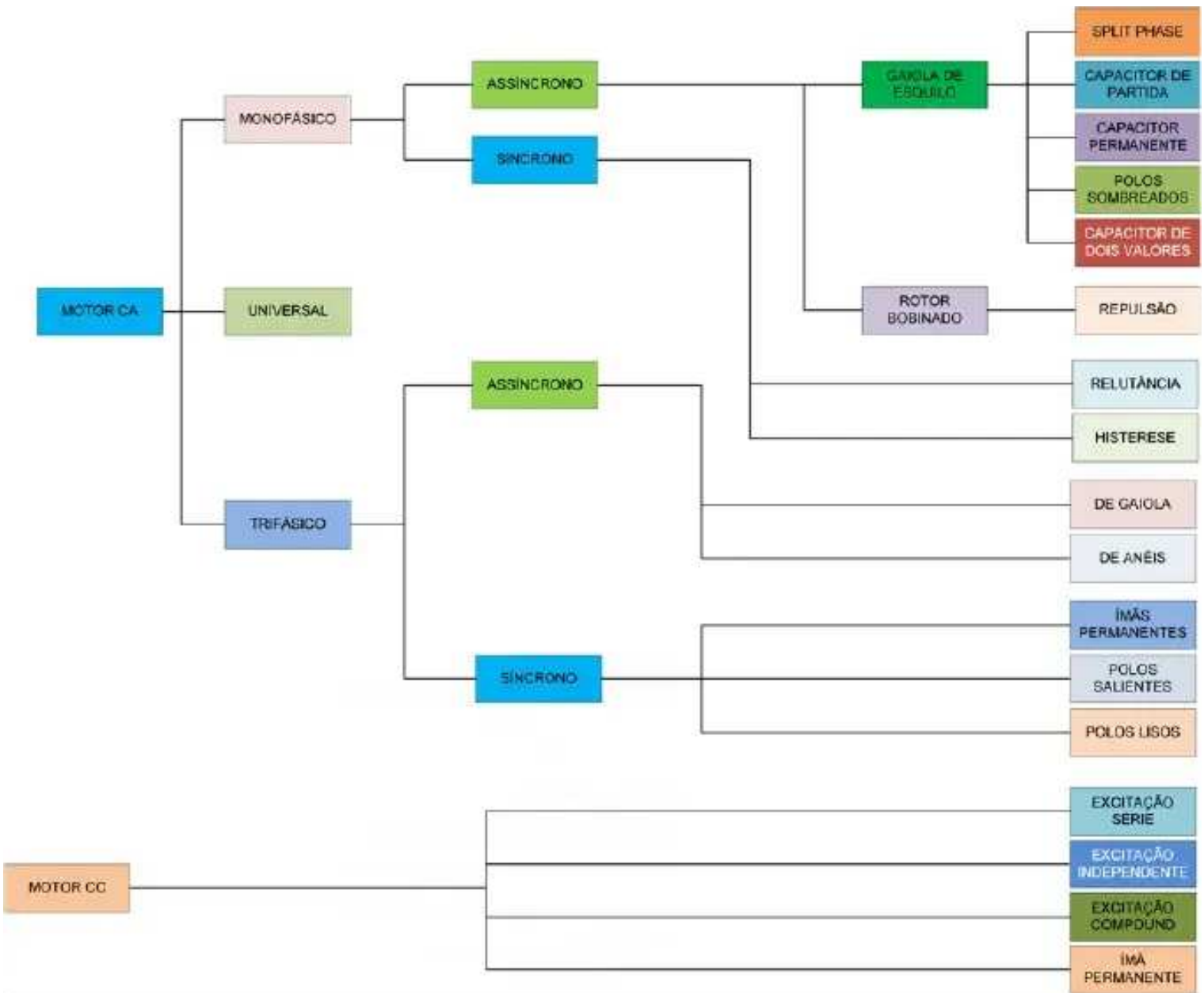


Figura 10 - Tipos de motores elétricos / Fonte: Franchi (2007, p. 20).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta as famílias de motores derivados dos motores CA e CC, onde para os motores CA temos os tipos monofásico, universal e trifásico, em que para os monofásicos temos os motores síncronos e assíncronos, e em que no tipo assíncrono, há os tipos gaiola de esquilo e rotor bobinado. Para os motores do tipo gaiola de esquilo, temos as tecnologias: split phase, capacitor de partida, capacitor permanente, polos sombreados e capacitor de dois valores, já para os motores de rotor bobinado, temos o tipo repulsão. Ainda nos motores monofásicos, quando assíncronos, temos os tipos: relutância e histerese. O motor trifásico possui duas tecnologias: assíncrono e síncrono, onde o assíncrono pode ser encontrado nos tipos de gaiola e anéis, já o síncrono tem três tipos: ímãs permanentes, polos salientes e polos lisos. Quanto ao motor CC, esta tecnologia conta com quatro tipos: excitação série, excitação independente, excitação compound e ímã permanente.

A Figura 10 mostra as principais famílias de motores derivados dos motores CA e CC, em que podemos associar a cada família tipos diferentes de tecnologias que operam sob diferentes limitações elétricas e mecânicas, onde para os motores CA temos os tipos:

- Monofásico.
- Universal.
- Trifásico.

Para os motores monofásicos, temos os síncronos e assíncronos, em que no tipo assíncrono, há os tipos: **gaiola de esquilo** e **rotor bobinado**. Para os motores do tipo gaiola de esquilo, **há as seguintes tecnologias**:

- Split phase.
- Capacitor de partida.
- Capacitor permanente.
- Polos sombreados.
- Capacitor de dois valores.

Já para os motores de rotor bobinado, temos o tipo repulsão e ainda nos motores monofásicos, quando assíncronos, temos os tipos: relutância e histerese.

No caso do motor trifásico, há duas tecnologias disponíveis: motores assíncronos e motores síncronos, onde o motor assíncrono pode ser encontrado nos tipos de gaiola e anéis, já o síncrono tem três tipos: ímãs permanentes, polos salientes e polos lisos.

Quanto ao motor CC, esta tecnologia conta com quatro tipos:

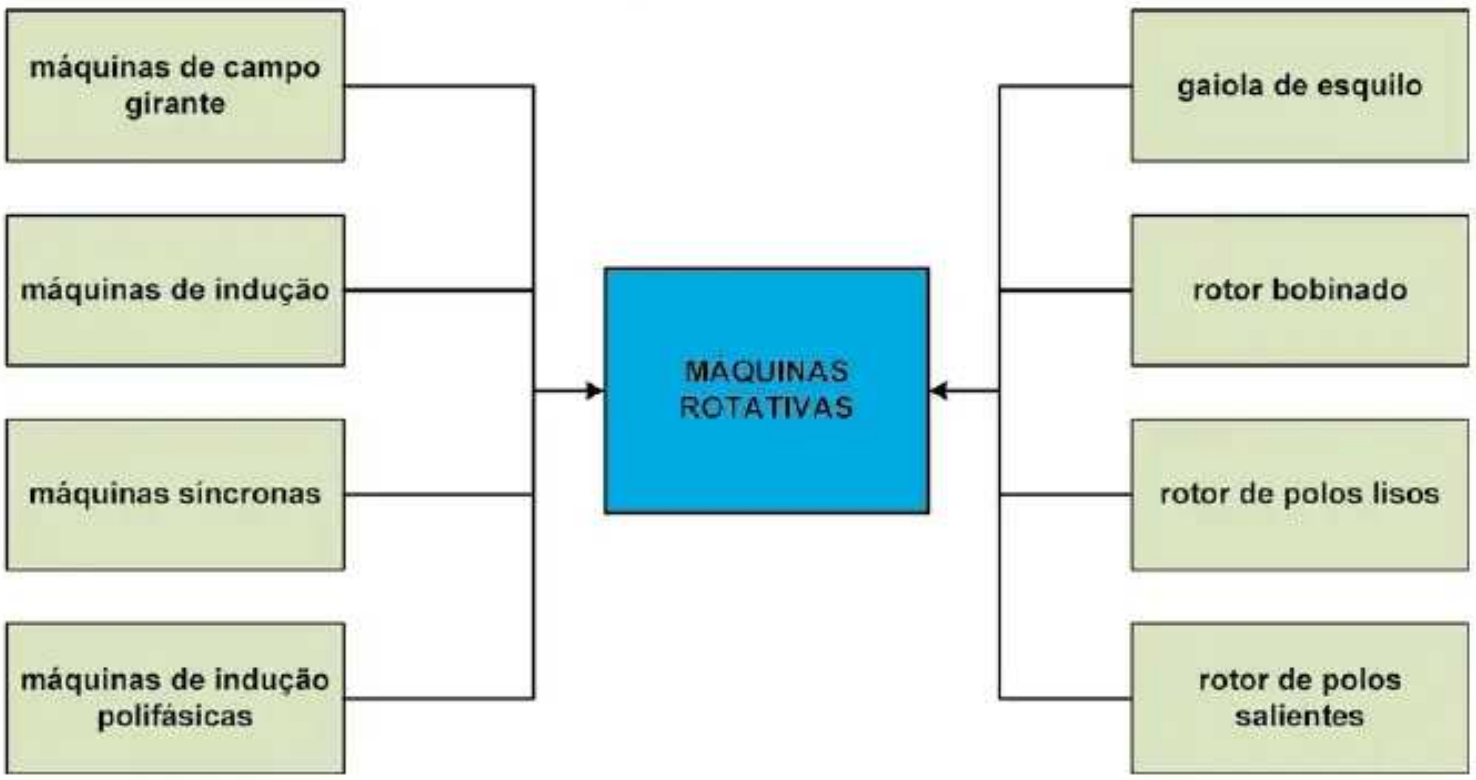
- Excitação série.
- Excitação independente.
- Excitação *compound*.
- Ímã permanente.

Nós iremos entrar em mais detalhes de máquinas elétricas rotativas nas próximas unidades, onde teremos a oportunidade de estudar sobre seu funcionamento dinâmico e demais temas de seu acionamento.

O conhecimento de máquinas rotativas é de extrema importância para o Engenheiro atuar nos ambientes profissionais industriais, onde temos motores de diversos tipos, sendo monofásicos e trifásicos, geradores, alternadores etc.

Com o conhecimento dessas máquinas, o Engenheiro pode atuar na definição da tecnologia adequada a cada caso de modo a aplicar máquinas elétricas rotativas com a devida eficiência e capacidade nas devidas aplicações que podem se estender desde máquinas de pequeno e grande porte, indústrias de processos, eletrodomésticos, brinquedos etc.

Chegamos ao final de mais uma unidade e então iremos resgatar os conceitos fundamentais que aprendemos até aqui por meio do mapa conceitual dado a seguir. Na oportunidade, convido você a revisitar cada um dos termos associados às máquinas rotativas e criar o seu próprio mapa conceitual com o significado de cada termo.



Descrição da Imagem: esta imagem remete ao mapa conceitual da Unidade 7, onde o termo "Máquinas rotativas" está ao centro e os demais termos são associados por meio de linhas, sendo: máquinas de campo girante, máquinas de indução, máquinas síncronas, máquinas de indução polifásicas, gaiola de esquilo, rotor bobinado, rotor de polos lisos e rotor de polos salientes.

MAPA MENTAL

1. **As máquinas rotativas são consideradas máquinas dinâmicas, pois apresentam partes móveis, como rotores e eixos, havendo uma relação direta entre o fluxo magnético e a f.m.m. em diferentes tipos de máquinas, podendo envolver instalação monofásica ou trifásica. Sobre as máquinas rotativas, assinale a alternativa correta.**

   a) As máquinas de indução possuem estator retangular com ranhuras nas paredes externas.

   b) As máquinas de indução polifásicas uma vez associadas às fontes de tensão de mesma configuração produzem campo magnético girante em torno dos enrolamentos percorridos pela corrente circulante, de velocidade síncrona, dada em função do número de pares de seus polos.

   c) Os motores de anéis podem possuir fonte de alimentação externa para a excitação dos indutores do estator e assim obter o controle de velocidade e torque em lugar dos reostatos, sendo neste caso conhecidos como máquinas de indução triplamente alimentadas, pois é trifásico.

   d) As máquinas de corrente contínua apresentam três partes principais que se distinguem como: o estator que aloja o imã permanente, bobinas auxiliares e enrolamentos compensadores, além do rotor que aloja as bobinas relacionadas à inversão de energia e lâminas do coletor.

   e) Os interpolos (também conhecidos como polos principais do motor) são estruturas fixadas entre os polos secundários e têm o objetivo de anular o campo magnético que possa vir a surgir na região interpolar causada pela corrente do rotor.

2. **Os motores elétricos de indução trifásicos possuem uma tecnologia que se difunde pelo mundo como sendo os principais motores utilizados pela indústria, graças a suas características e parâmetros funcionais, dos quais podemos afirmar que:**

   a) Os motores de gaiola de esquilo possuem anéis para permitirem a conexão de seus rotores à rede elétrica.

   b) O rotor de um motor do tipo gaiola de esquilo possui chapas e condutores isolados para que o fluxo se intensifique e o motor tenha maior torque.

   c) As escovas de um motor assíncrono trifásico do tipo gaiola de esquilo são necessárias para que seu rotor bobinado possa ser excitado por meio de anéis.

   d) A tensão induzida no rotor produz como resultado circulação de corrente pelos condutores do rotor e com isso o surgimento de um fluxo magnético contrário ao fluxo gerador, causando o movimento.

   e) Os motores trifásicos do tipo rotor de gaiola de esquilo possuem baixo rendimento

AQUI É COM VOCÊ

e alta relutância.

3. **Os motores de corrente contínua possuem topologia diferenciada, tendo poucas tecnologias aplicadas, comparadas ao número de tipos diferentes de motores CA. Na construção de máquinas de corrente contínua, podemos afirmar que o rotor apresenta as principais funções:**

   a) Acionar dispositivos remotamente com alto desempenho, pois não possui ímãs permanentes.

   b) Incorporar o capacitor de partida, uma vez que este motor depende de uma fase virtual para entrar em operação.

   c) Permitir a ação motora mecânica, prover chaveamento para a comutação, reunir os condutores indutores de tensão e de torque eletromagnético e representar baixa relutância para o fluxo.

   d) Deslocar o eixo da máquina com alta relutância e baixo fluxo magnético.

   e) Movimentar cargas com aceleração constante sem a necessidade de controladores de velocidade, pois seu torque de partida é unitário até 33% da frequência do sinal de alimentação.

Motores síncronos e assíncronos e alternadores

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Nesta unidade, o estudante terá a oportunidade de aprender sobre os tipos de motores síncronos e assíncronos, suas principais características funcionais, aplicações em ambientes e parâmetros de acionamento, além de conhecer a respeito dos alternadores, suas funções, especificações e aplicações.

Você já deve ter ligado um eletrodoméstico que possua motor na sua casa em algum momento, como, por exemplo, liquidificador, furadeira, batedeira, enceradeira, ventilador, máquina de lavar roupas, refrigerador, entre outros. Você notou que o eletrodoméstico (normalmente) vem acompanhado de um cabo elétrico e plug que permite sua ligação na tomada da residência. Também notou que alguns aparelhos possuem uma chave na parte de trás para selecionar a tensão de trabalho (127 V ou 220 V), porém, diferentemente dos eletrodomésticos eletrônicos, na maioria dos casos em que temos motores elétricos mais "potentes" em uma máquina, temos apenas o valor de uma tensão de operação, apenas sendo ou 127 V ou 220 V.

Contudo, o que isso tem a ver com o estudo de motores síncronos e assíncronos e alternadores? É justamente isso que vamos analisar ao estudar o funcionamento dessas máquinas. Os pré-requisitos de entrada definem como devem funcionar e como serão alimentadas.

Conforme estudamos até aqui, vimos na última unidade que existem vários tipos de motores elétricos, desde alimentados em corrente alternada até os motores CC que convertem a energia elétrica em energia mecânica, além disso, existem máquinas que podem inverter este papel, convertendo assim a energia mecânica em energia elétrica.

E você, já sabe como funciona um gerador de eletricidade que pode utilizar um combustível, como, por exemplo, a gasolina, em eletricidade? E qual a diferença entre o motor da sua furadeira elétrica portátil e o motor utilizado em um moinho com 100 CV de potência?

Os motores elétricos e os alternadores ocupam boa parte das aplicações industriais. Na maioria dos casos onde há a necessidade de **movimento**, os **motores elétricos** ainda são a solução em quase todas as máquinas elétricas, além disso, quando há a necessidade de **converter a energia** produzida pelo movimento **mecânico** de um eixo em **energia elétrica** que possa ser utilizada na alimentação de outras máquinas elétricas, temos a figura do alternador, que contribui imensamente neste papel de possibilitar o funcionamento de máquinas de maneira alternativa, em locais onde não se pode ter o atendimento de uma concessionária ou mesmo durante horários onde o custo de utilização da eletricidade justifica essa alternativa.

No ambiente industrial, temos diversas aplicações e ambientes diferentes, que podem definir a necessidade de maior ou menor velocidade do eixo da máquina, capacidade de potência, dimensões mecânicas, consumo de energia elétrica (consequentemente a eficiência da máquina) e até mesmo o seu grau de proteção, adequando-a a ambientes onde pode haver a presença de umidade ou poeira.

Há alguns anos o sistema de transporte vem experimentando tecnologias de veículos movidos a motores elétricos e com sistema regenerativo de energia, o qual permite aproveitar o movimento do veículo para gerar energia e armazená-la em suas baterias, dessa forma, ao se deslocar, um carro elétrico pode produzir seu próprio combustível.

Em aplicações industriais aplicadas, como no caso de uma centrífuga de grande porte, na qual as velocidades de giro são dos milhares de rotações por minuto, com cargas que podem chegar às toneladas, atingir a velocidade nominal de operação consome quantidade significativa de energia de forma controlada. Quando essa máquina atinge o fim do ciclo de operação e inicia sua desaceleração, a energia do movimento no eixo pode ser convertida em energia elétrica e ser injetada na rede de distribuição, semelhante ao processo do veículo regenerativo, aproveitando a energia inercial do eixo em movimento.

Além desses exemplos, temos a geração de energia a partir de várias fontes de energia mecânica, como, por exemplo, as quedas d'água de uma barragem em uma usina hidrelétrica, o movimento dos ventos em um aerogerador, o movimento das águas de um rio, o vapor oriundo da queima de combustível sólido, como no caso de resíduos da moagem de cana e outros materiais em caldeiras etc. Com essas aplicações, as máquinas elétricas são amplamente utilizadas na indústria, convertendo energia elétrica em mecânica e vice-versa.

É muito interessante como temos acesso a diversas formas de energia em nosso dia a dia e como elas são utilizadas. Mais interessante ainda é como temos oportunidades de aproveitar em situações onde temos movimento, por exemplo, para carregar baterias de nossos smartphones, alimentar os sistemas de iluminação que são dezenas de vezes mais eficientes com as lâmpadas LED, entre outros.

Com base nos exemplos que vimos até aqui, onde podemos reaproveitar a energia

mecânica em algumas máquinas para gerar energia elétrica, faça o levantamento de 5 máquinas que possuem movimento e que poderiam ter sistema regenerativo,

como, por exemplo, a máquina de lavar, que realiza o processo de centrifugação acionando o seu motor e, quando o cesto está em movimento, a energia cinética pode ser utilizada para acionar uma máquina elétrica que converte o movimento inercial em energia elétrica.

Após listar esses 5 exemplos, aponte como seria o processo de reaproveitamento dessa energia gerada da desaceleração do eixo das máquinas, sendo possíveis as opções de injetar a energia na rede de distribuição ou armazenando em baterias para uso posterior.

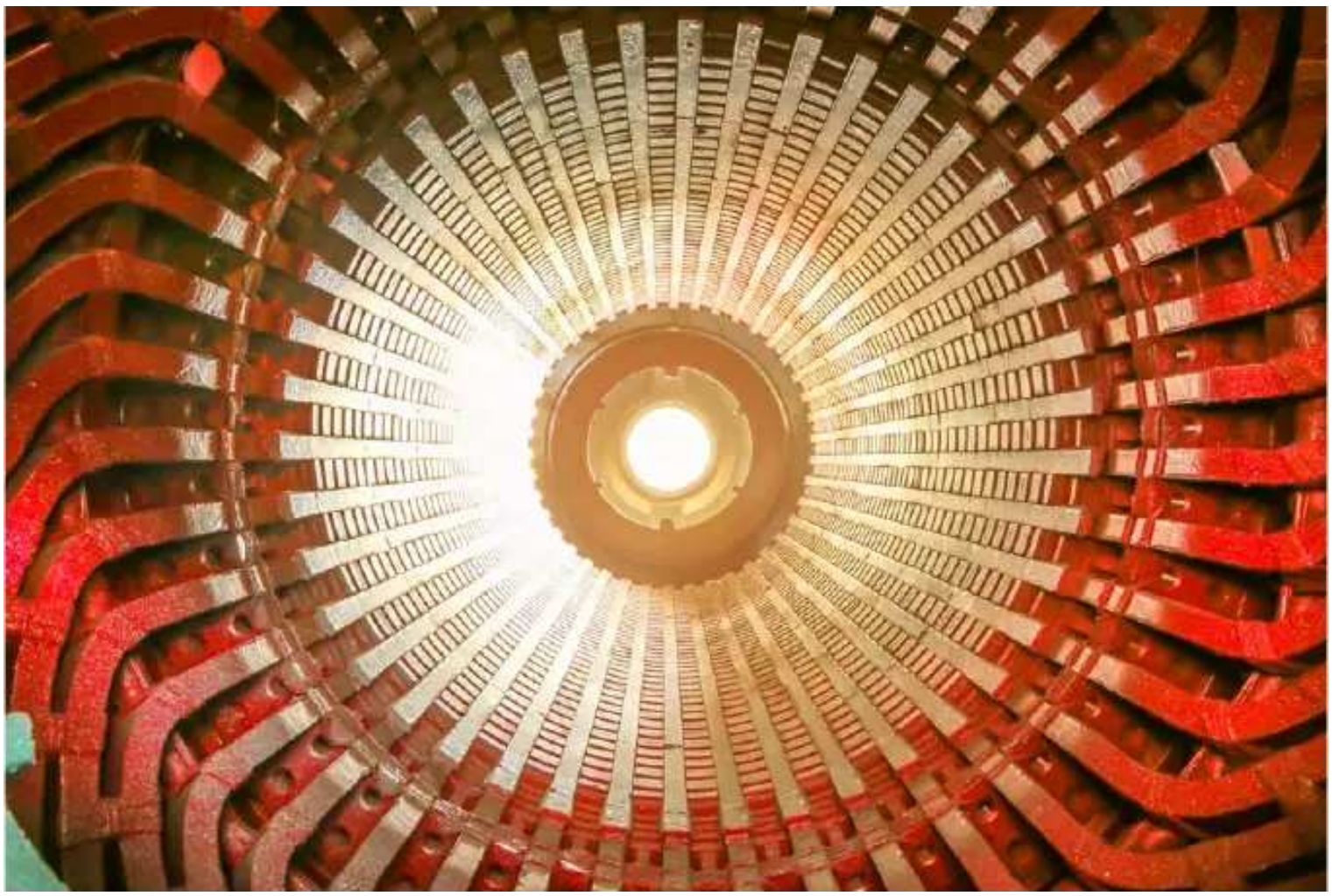
Acionar motores elétricos para utilização de máquinas e gerar energia a partir do movimento de eixos são processos há muito tempo debatidos pela ciência e utilizados pela indústria. Atualmente temos à nossa disposição uma ampla linha de produtos no mercado que atendem as mais específicas aplicações em termos de motores e geradores, sempre com o desafio de obter o melhor rendimento e eficiência energética.

Com base no exercício de levantar as 5 máquinas que potencialmente poderiam ter sua energia mecânica aproveitada, convertida em energia elétrica, daí então aplicada ao uso (armazenada em baterias ou ligada diretamente à rede por meio de inversores), resulta que temos situações diferentes que requerem análise de viabilidade. Por este motivo, reflita a respeito da sua análise em torno dos exemplos levantados e:

Reflexão 1: caso tenha optado por entregar a energia diretamente à rede da concessionária, verifique qual seria a viabilidade desta operação, dado que teria um custo significativo para adaptar a máquina a essa função regenerativa, associado ao fato de que precisamos pagar impostos para utilizar a rede da concessionária.

Reflexão 2: caso tenha optado por armazenar a energia em baterias, reflita sobre o tempo de vida útil médio de baterias e como você faria para dar o devido descarte desse material quando este tempo chegar, sabendo-se que o custo de cada célula de baterias novas é bastante significativo.

DIÁRIO DE BORDO



Nós já vimos na unidade anterior que existe uma grande diversidade de tipos de motores e que cada tecnologia possui especificidades que as tornam adequadas e viáveis ao uso em diferentes aplicações. No caso de uma bomba utilizada em uma estação de tratamento de água, por exemplo, o regime de serviço e a potência do motor utilizado é diferente do motor projetado para uma furadeira elétrica, por exemplo.

Já definimos na Unidade 7 alguns termos relativos às máquinas síncronas e assíncronas e, nesta unidade, iremos estudar suas características e parâmetros funcionais. Basicamente, um motor assíncrono possui a configuração dividida entre (FRANCHI, 2007):

- **circuito magnético estático;**
- **bobinas;**
- **rotor.**

O *circuito magnético estático* é dado na região da carcaça do motor, local onde arranjos de chapas alinhadas e isoladas são especialmente desenhadas para, quando juntas, formarem as ranhuras dedicadas mesmo em ferro fundido, dependendo do fabricante, tipo de motor, capacidade de potência etc. Esta parte do motor é considerada a mais robusta e, portanto, está ligada mecanicamente à fixação do motor e tem papel definitivo no ajuste e alinhamento do motor em seu acoplamento com a máquina que o utiliza.

As *bobinas* do motor são alocadas nas ranhuras do estator, estando então dispostas com seus terminais na "**caixa de terminais**" (Figura 1), local onde ocorrem as ligações das bobinas, que podem ser feitas

a alojar os enrolamentos das bobinas do estator.

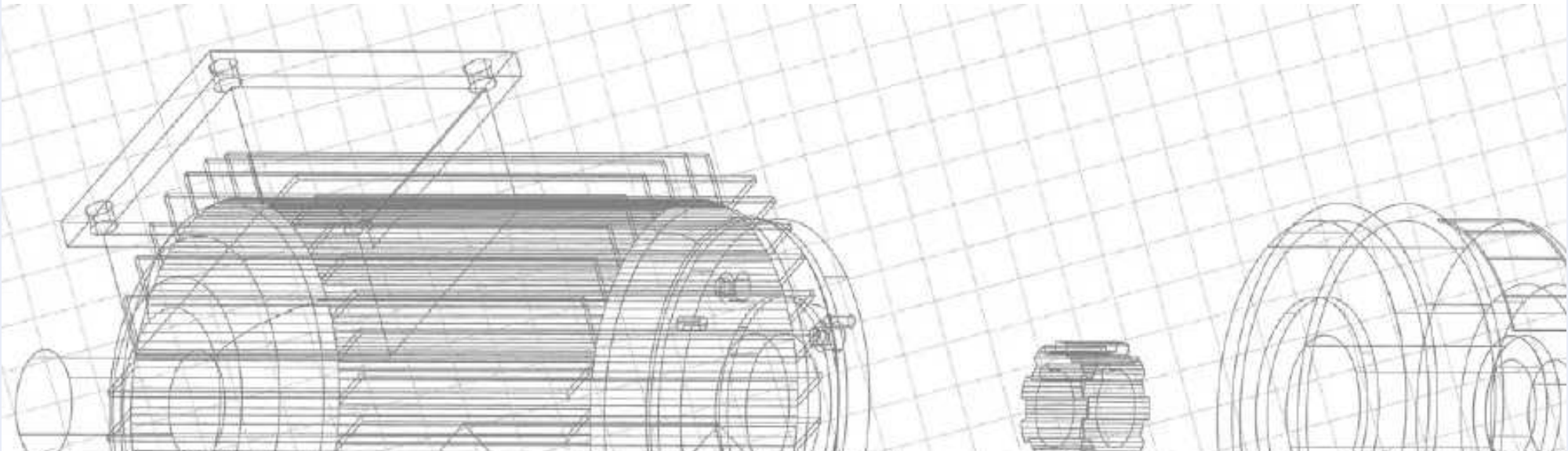
O *estator* é fabricado normalmente em alumínio e suas ligas ou

na configuração **estrela** (380 V) ou **triângulo** (220 V).

Figura 1 - Motor assíncrono de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo - vista com abertura lateral
Fonte: adaptada de Weg (2021).

Descrição da Imagem: esta figura apresenta um motor de indução trifásico com um quarto de sua lateral removido para que possamos ver em seu interior. Na figura, é possível visualizar o rotor do motor intacto, as chapas do estator em corte, as bobinas do estator em corte, assim como as tampas e ventilador também em corte.

Cada bobina de um motor pode ser composta de várias outras bobinas menores que associadas em série formam a bobina principal, havendo três bobinas em um motor de 6 terminais, denominadas L1, L2 e L3, onde para cada uma temos suas respectivas derivações. No caso do exemplo de um motor com 24 ranhuras, cada bobina principal possui 4 bobinas (**a**, **b**, **c** e **d**), que formam laços e ocupam 2 ranhuras cada, associadas em série, conforme podemos observar na Figura 2.



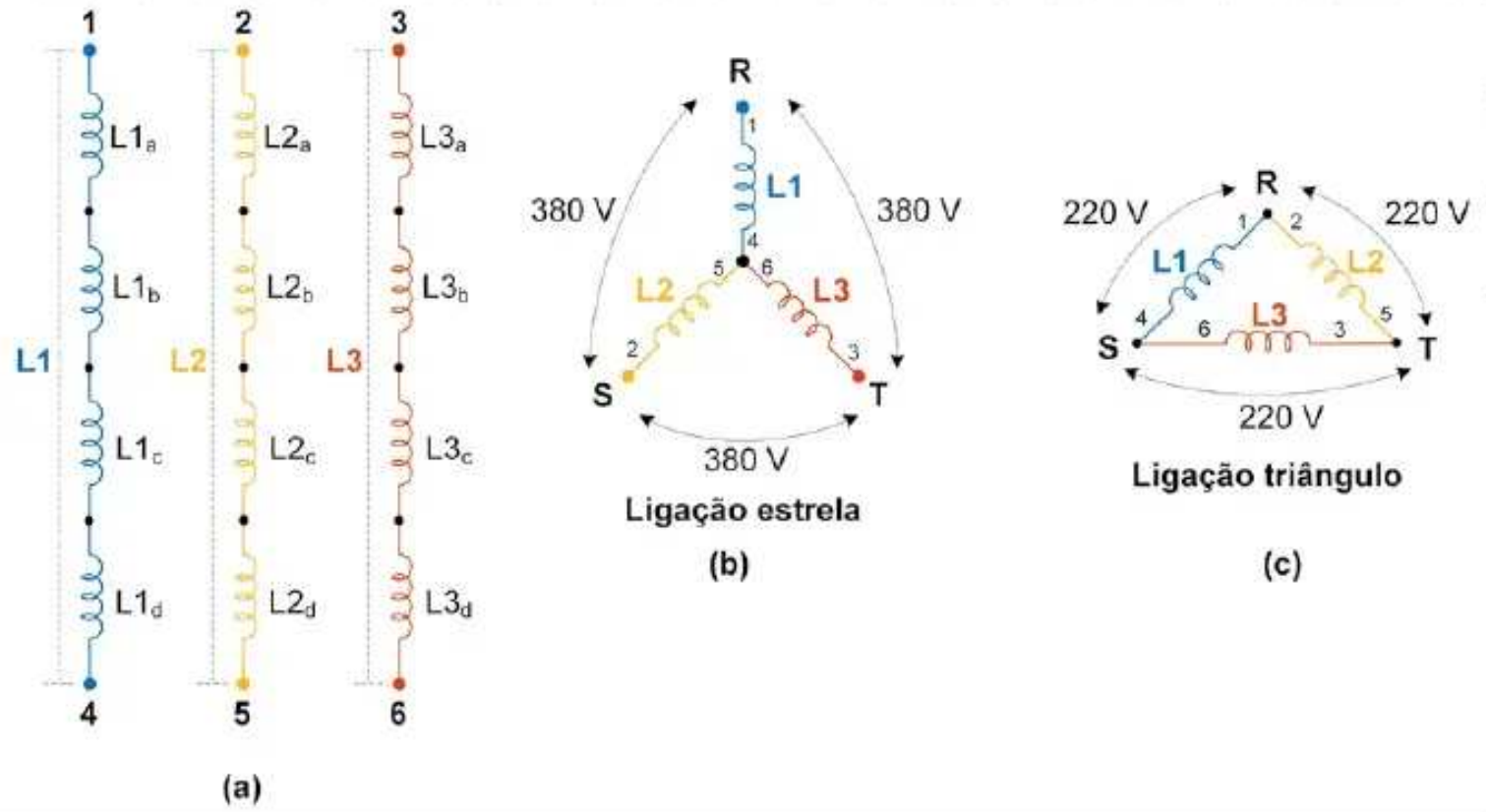
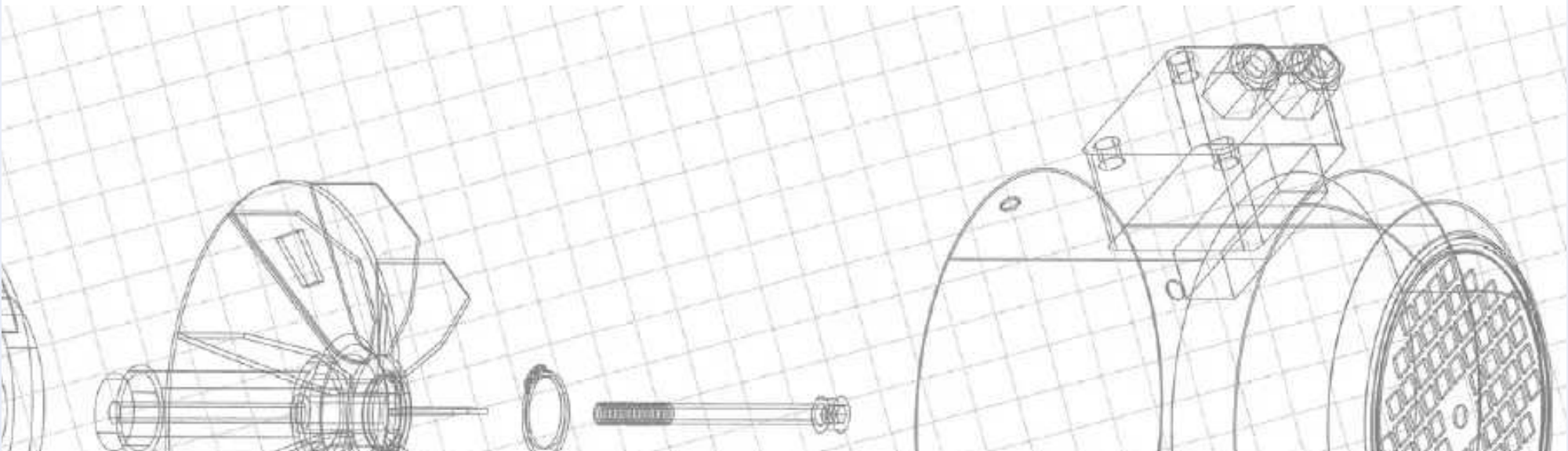


Figura 2 - Diagrama de associações de bobinas de um motor trifásico / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura apresenta os diagramas de associação entre as bobinas de um motor de indução trifásico, onde há três representações (a), (b) e (c). Em (a), temos as bobinas principais L1, L2 e L3 compostas de suas 4 bobinas L1a, L1b, L1c e L1d, sendo a mesma ideia para as demais bobinas L2 e L3, onde cada bobina principal tem números que identificam suas ligações, sendo para a bobina L1 os terminais 1 e 4, bobina L2 os terminais 2 e 5 e bobina L3 os terminais 3 e 6. Em (b), temos um esquema de ligação do tipo estrela, em que os terminais das bobinas L1, L2 e L3 de um lado estão todos interligados no mesmo ponto (terminais 4, 5 e 6), já os demais terminais (1, 2 e 3) são associados à rede elétrica independentemente em fases denominadas R, S e T, respectivamente, onde entre cada fase temos potenciais de tensão elétrica sendo aplicado de 380 V para este esquema de ligação. Já na Figura 2 (c) é possível ver o esquema de ligação triângulo, no qual as bobinas L1, L2 e L3 estão conectadas umas nas outras em série (formando um anel triangular), de modo que cada uma, posicionada no formato de triângulo onde cada bobina é um lado dele, tem em suas ligações os terminais ligados em comum 1 e 2 (ligação entre as bobinas L1 e L2), 3 e 5 (ligação entre as bobinas L3 e L2) e 4 e 6 (ligação entre as bobinas L1 e L3), respectivamente.



Note que cada bobina ocupa duas ranhuras, pois consiste em um laço. Sendo 4 bobinas por enrolamento e tendo 3 enrolamentos no estator, no caso do exemplo, um motor com 24 ranhuras, essas são preenchidas conforme a representação dada na Figura 3:

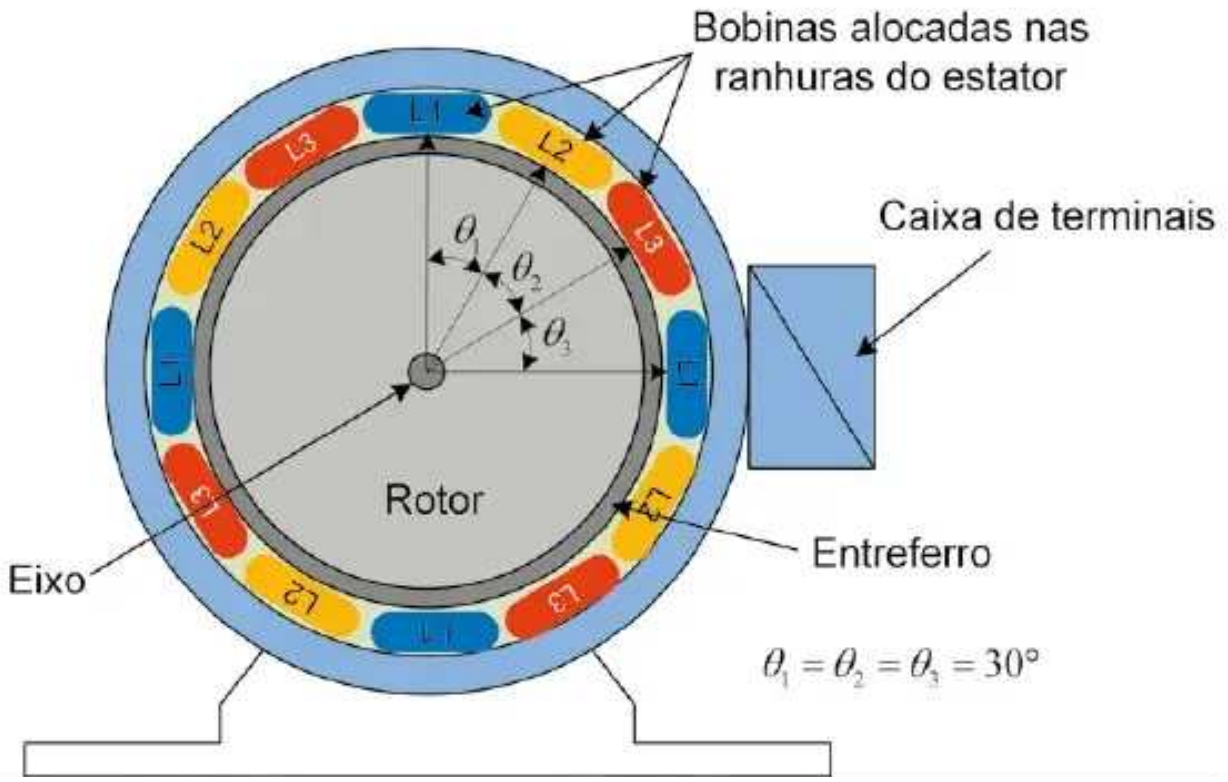


Figura 3 - Motor de 24 ranhuras em corte - arranjos de bobinas distribuídas uniformemente nas ranhuras do estator / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma representação de um motor trifásico de 24 ranhuras em corte perpendicular ao eixo, de modo a exibir cada uma das bobinas L1, L2 e L3 alocadas nas ranhuras do estator, sendo que cada um dos enrolamentos é dividido em 4 bobinas. O desenho do motor apresenta também caixa de terminais, eixo, rotor e entreferro identificados, além dos ângulos entre as bobinas de 30°.

Na Figura 3, é apresentada a forma com que cada bobina se posiciona com relação ao eixo do rotor, distribuindo sua indução de forma uniforme com ângulos $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 30°$ entre os arranjos magnéticos do circuito do estator.

O *rotor* do motor assíncrono do tipo **gaiola de esquilo** já foi apresentado na unidade anterior e consiste em uma estrutura onde condutores em curto-circuito são alojados em um sólido cilindro de metal formado pela união de lâminas de metal com tal geometria que permite a alocação dos condutores.

Observe por meio da Figura 4 as chapas do estator e do rotor, em que é possível entender onde serão alocados os condutores. Neste exemplo, temos um estator de 18 ranhuras, permitindo desta forma a distribuição de cada bobina em 3 arranjos

associados em série, posicionando-se no estator com ângulo de 120^{o} entre cada bobina do mesmo enrolamento.

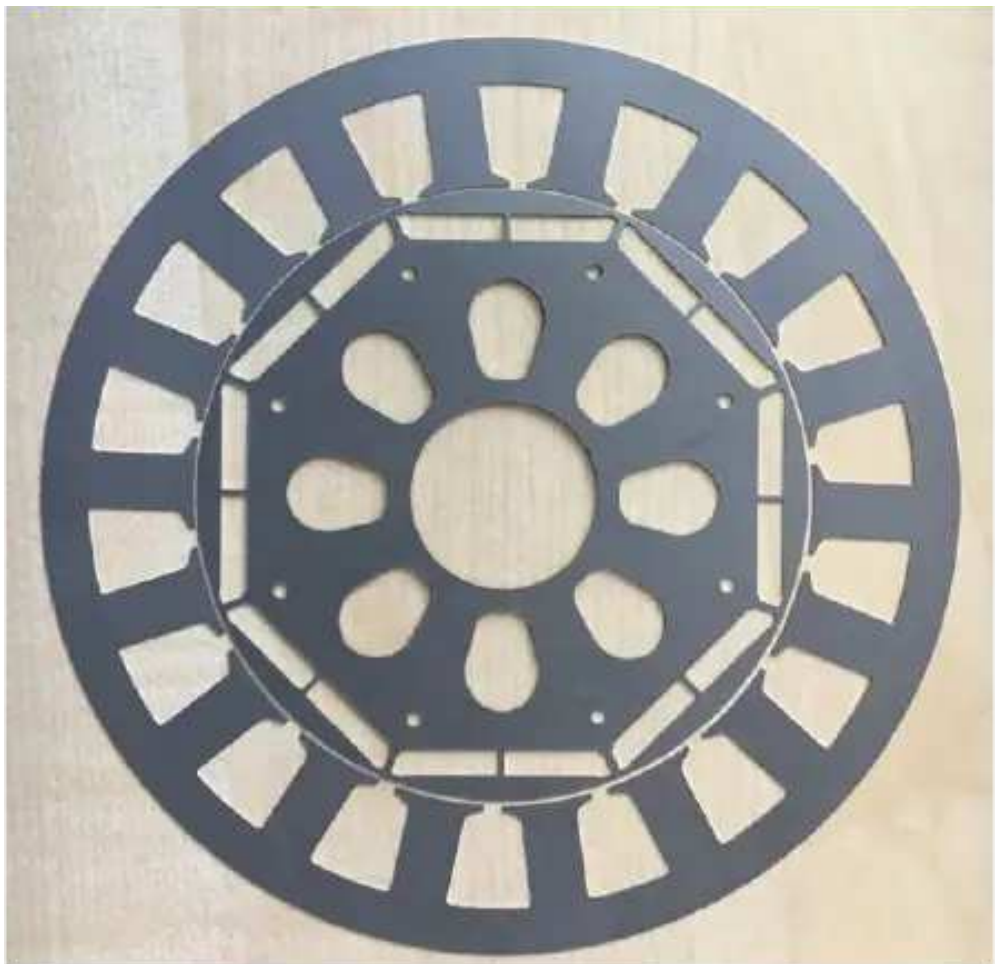


Figura 4 - Chapas do estator e do rotor utilizadas na construção de motores elétricos

Descrição da Imagem: esta figura apresenta as chapas de um motor de indução com lâminas utilizadas na construção do rotor inscritas no centro da chapa que constitui o estator.

Observe nessa imagem da Figura 4 a distância entre a chapa do rotor e a chapa do estator, a qual denominamos de entreferro e deve ser mínima, a fim de minimizar a corrente a vazio (já que o campo magnético a ser induzido no rotor é função do campo magnético produzido no estator, assim, quanto menor a distância, maior a intensidade de campo). Este fato também eleva o fator de potência a vazio (FRANCHI, 2007).

Já nos motores de indução monofásicos com rotor de gaiola de esquilo temos algumas características marcantes que merecem atenção. Sua denominação se faz dado que é projetado para atuar com apenas uma tensão de fase.

Motores monofásicos não apresentam campo girante, e sim campo magnético pulsante, impedindo que apresentem torque de partida.
Fonte: adaptado de Franchi (2007).

Pelo fato de os motores monofásicos não terem uma segunda fase, estes são providos de um enrolamento primário que é conectado diretamente à rede elétrica e outro enrolamento auxiliar, este que possui um capacitor eletrolítico associado em série. Tal malha (indutor auxiliar e capacitor) é então associada em

paralelo com o enrolamento principal de modo que seja então estabelecida uma defasagem de 90º entre as correntes do enrolamento principal e do auxiliar.

Figura 5 - Motor monofásico em corte lateral

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma foto de um motor monofásico em corte lateral que permite a visualização de seu interior, contendo rotor de gaiola de esquilo, eixo, rolamentos, carcaça, caixa de terminais e caixa para alocar o capacitor eletrolítico de partida.

O recurso do circuito auxiliar permite o aumento do surgimento de campo girante de partida, porém necessita de um contato que desacopla o circuito auxiliar após atingir a velocidade nominal, contato este conhecido como "chave centrífuga" ou "contato centrífugo", que apresenta falhas após tempo de uso por desgaste.

É bastante comum a aplicação de motores monofásicos em pequenas máquinas com capacidade de até 3 CV, dado que, pelo fato de serem alimentados por uma fase apenas, potências superiores a este valor poderiam desequilibrar a distribuição de cargas no sistema elétrico, aplicando-se bem nas situações onde não há a disponibilidade de 3 fases.

O custo relacionado ao projeto deste motor resulta em elevado valor, tornando-se mais caro que um modelo trifásico quando comparado com capacidades de potências iguais, além disso, a potência que o motor monofásico pode assumir está entre 60% e 70% de outro motor com as mesmas dimensões, isso inviabiliza

Além das características dos motores monofásicos, devemos considerar também o fato de que este motor não pode ter seu **sentido de giro** alterado diretamente, ou seja, precisa ser desligado, realizada a manobra necessária e acionado novamente para ter o novo sentido de giro. Este tipo de motor apresenta baixo rendimento.

Os motores monofásicos mais utilizados atualmente são de **dois**, **quatro** e **seis terminais**. No caso do **motor de dois terminais**, há algumas limitações que impossibilitam a inversão do sentido de giro, além disso, esses motores operam apenas em um valor de tensão.

Já o **motor monofásico de 4 terminais** permite a operação com **dois valores de tensão**, sendo sempre uma o dobro da outra, assim, se uma for de 127 V, a outra será de 254 V, porém o sentido de giro também não pode ser alterado neste motor.

No caso do motor **monofásico de 6 terminais**, é possível a instalação em dois valores de tensão e também é possível inverter o seu sentido de giro, que assume o novo sentido so-

seu uso em aplicações onde há restrições de medidas e necessidade de alta densidade de potência.

mente após desligado o motor e ligado novamente.

Os motores monofásicos de forma global são divididos em cinco principais tipos, sendo o primeiro desta lista o "**motor monofásico de capacitor de partida**", que conforme podemos ver na Figura 6 apresenta o rotor do motor interagindo com o campo magnético gerado pelo enrolamento principal juntamente com o campo magnético produzido pelo enrolamento secundário durante a partida.

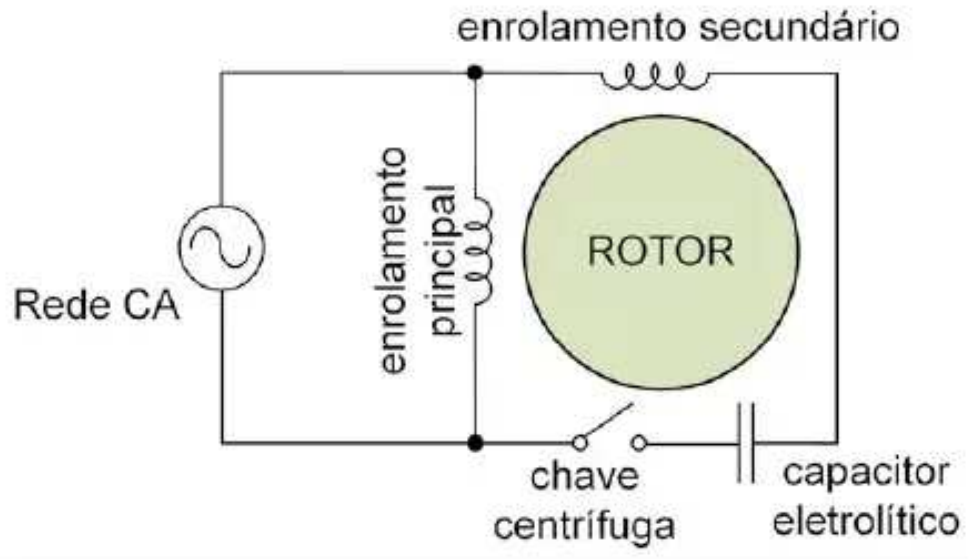


Figura 6 - Motor monofásico de capacitor de partida - chave centrífuga associa um enrolamento auxiliar durante a partida / Fonte: adaptada de Franchi (2007).

Descrição da Imagem: esta figura mostra o desenho de um diagrama de ligações entre os enrolamentos principal e secundário do motor de capacitor de partida, chave centrífuga e capacitor eletrolítico.

O enrolamento secundário possui defasagem com relação ao enrolamento principal graças à sua geometria e ao capacitor associado em série, o qual permite o aumento de torque do motor durante a partida, adequando este motor a aplicações onde é necessário vencer momentos de inércia maiores comparados aos demais modelos monofásicos.

O próximo motor monofásico é conhecido como **motor de polos sombreados** (do inglês *shaded pole*). Este motor é altamente confiável e normalmente utiliza topologia construtiva de

polos salientes. Note na Figura 7 um desenho que representa o motor de polos sombreados.

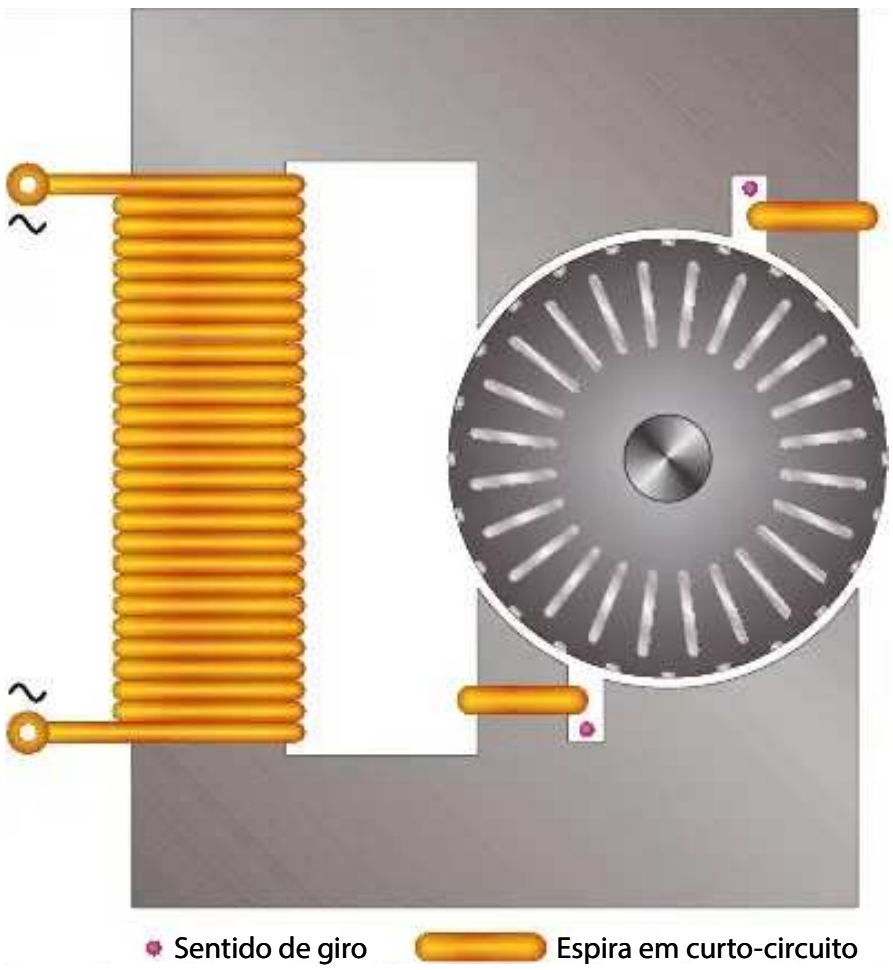


Figura 7 - Motor monofásico de polos sombreados - a espira de cobre em curto-circuito determina o sentido de giro

Descrição da Imagem: esta figura mostra um desenho representativo de um motor monofásico de polos sombreados, onde é possível observar a bobina do motor, seu núcleo retangular com o rotor inscrito e duas espiras de cobre posicionadas diagonalmente ao rotor definindo o sentido de giro.

Veja que o núcleo deste motor é retangular e o rotor se encontra inscrito no núcleo alinhado em contraposição à bobina que é conectada à rede elétrica. Seu sentido de giro é determinado por espiras de cobre enroladas no núcleo em curto-circuito, que provocam um atraso no fluxo magnético circulante, já que a corrente induzida nas espiras em curto produz fluxo concorrente com o fluxo gerador, de tal forma que ocorre o movimento.

Também temos o motor monofásico de **fase dividida** (ou em inglês *split phase*). Neste tipo de motor, assim como no motor de capacitor de partida, temos o uso de uma chave centrífuga e um enrolamento secundário associado em série com este, justamente para gerar uma defasagem de $90°$ necessária ao início da rotação.

Neste tipo de motor, o torque de partida é pequeno e aplica-se a pequenas máquinas com até ¾ de CV.

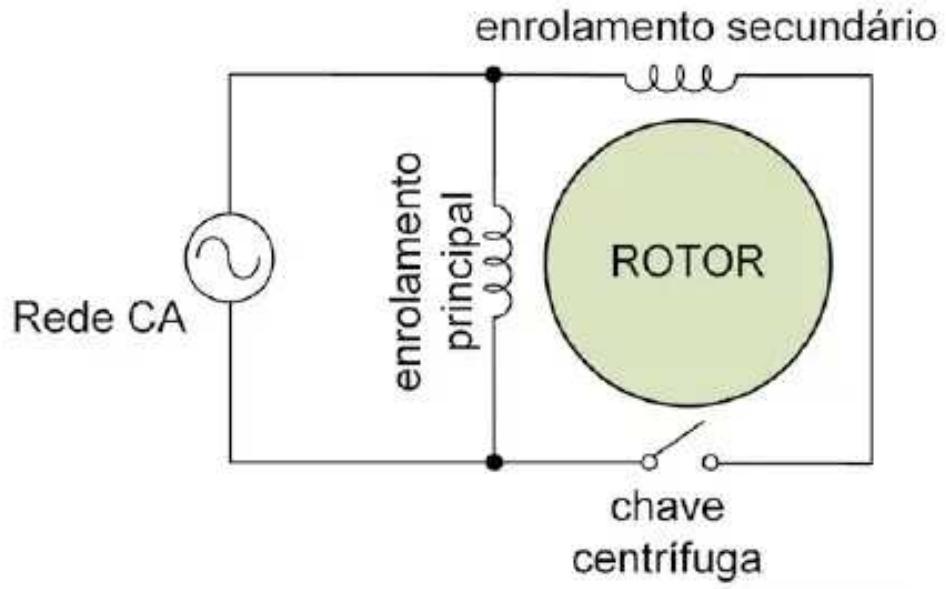
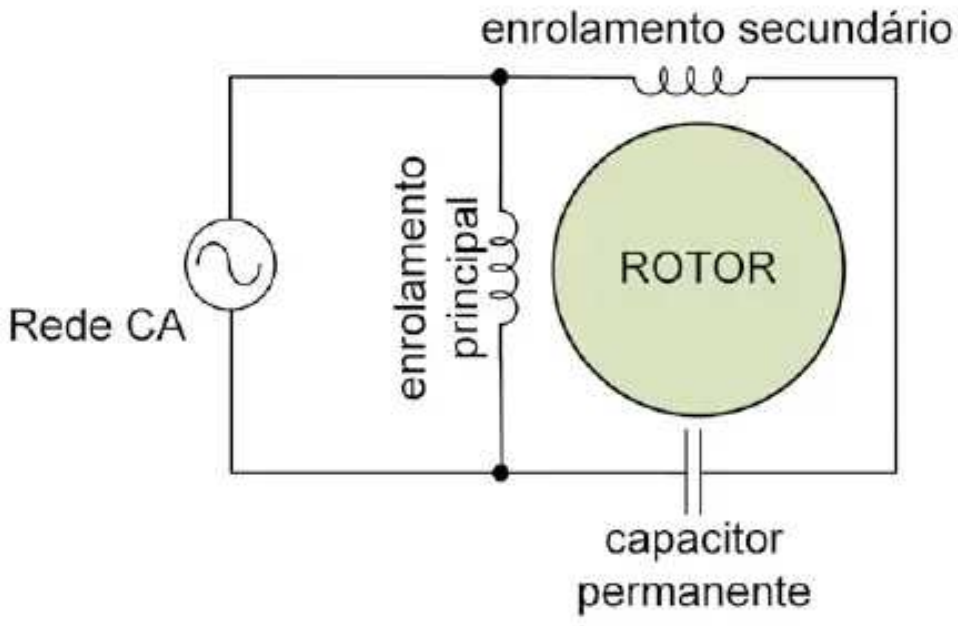


Figura 8 - Motor de fase dividida / Fonte: adaptada de Franchi (2007).

Descrição da Imagem: esta figura mostra o desenho de um diagrama de ligações entre os enrolamentos principal e secundário do motor de fase dividida e chave centrífuga.

A chave centrífuga só é desligada após 75% a 80% da rotação nominal do motor, uma vez que esta chave possui elementos de peso dimensionados para se afastar do eixo do motor na medida em que este acelera (força centrífuga) e com isso o contato é aberto.

Já o **motor monofásico de capacitor permanente** (que vem do inglês *permanent split capacitor*) é dotado de um enrolamento principal e outro secundário associado em série com um capacitor exclusivamente projetado para atender a demandas como essa, proporcionando aumento de torque de partida e de fator de potência do motor, além do baixo ruído emitido.



Descrição da Imagem: esta figura mostra o desenho de um diagrama de ligações entre os enrolamentos principal, secundário e capacitor, do motor de capacitor permanente.

Figura 9 - Motor de capacitor permanente / Fonte: adaptada de Franchi (2007).

Finalmente, temos o **motor monofásico com dois capacitores** (ou em inglês *two value capacitor*). Neste motor, temos dois capacitores que atuam um no arranque do motor, comutado ao enrolamento secundário por meio de uma chave centrífuga (da mesma forma que no motor de capacitor de partida) e outro capacitor permanente (da mesma forma que no motor de capacitor permanente).

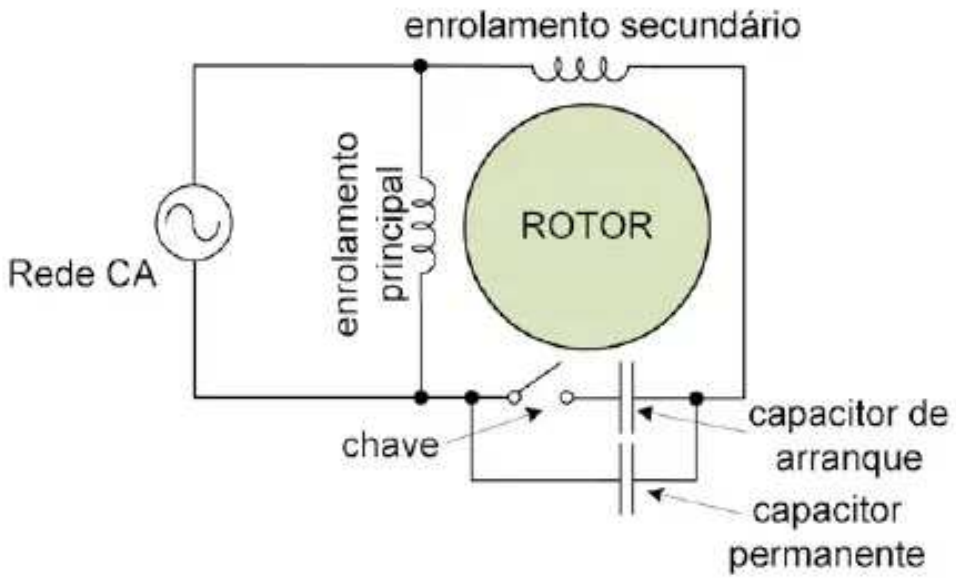


Figura 10 - Motor monofásico de dois capacitores
Fonte: adaptado de Franchi (2007).

Descrição da Imagem: esta figura mostra o desenho de um diagrama de ligações entre os enrolamentos principal, secundário, capacitores de arranque e de partida e chave do motor de dois capacitores.

Este motor apresenta o comportamento equivalente à união dos dois motores "de capacitor de partida" com o "motor de capacitor permanente", desta forma, resultando em um motor com alto torque tanto na partida quanto em regime constante de serviço, a ponto de aplicar-se a potências acima de 1 CV.

Já o **motor universal** recebeu este nome devido à sua versatilidade em ser utilizado em praticamente qualquer máquina pequena e portátil em qualquer lugar do mundo, possibilitando a um viajante, por exemplo, utilizar seu equipamento em lugares diversos, isso possibilita este a ser alimentado tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua (KOSOW, 2005).

Este motor é dotado da capacidade de atuar em tensões que podem variar de 1 V até 250 V e operar com frequências de 0 Hz dem chegar até os □ CV, que normalmente atendem as necessidades de um aspirador de pó, furadeira portátil ou até mesmo de uma máquina de costura industrial. Para potências superiores a □ CV, este motor não apresenta desempenho favorável.

O motor universal apresenta velocidades de eixo da ordem de 10000 rpm à plena carga e pelo fato de possuir velocidade a vazio muito elevado, em alguns casos, onde a carga não está constantemente acoplada ao eixo (caso de furadeiras, barbeadores, máquinas de costura etc.), são utilizadas engrenagens que tendem a diminuir a chance deste motor em disparar enquanto a vazio, o que poderia danificar permanentemente a máquina elétrica ou até mesmo causar acidentes.

Observe na Figura 11 um diagrama que representa o motor universal em cada semiciclo da tensão CA. Veja que, tanto no semiciclo positivo quanto no negativo da fonte CA monofásica, o sentido de giro do rotor permanece o mesmo, porém há a inversão de sentido de campo e das correntes de armadura, isso lhe confere a capacidade de operar tanto em CC quanto em

(sinal CC) até $60\ Hz$ e normalmente possui potências que po- CA (KOSOW, 2005).

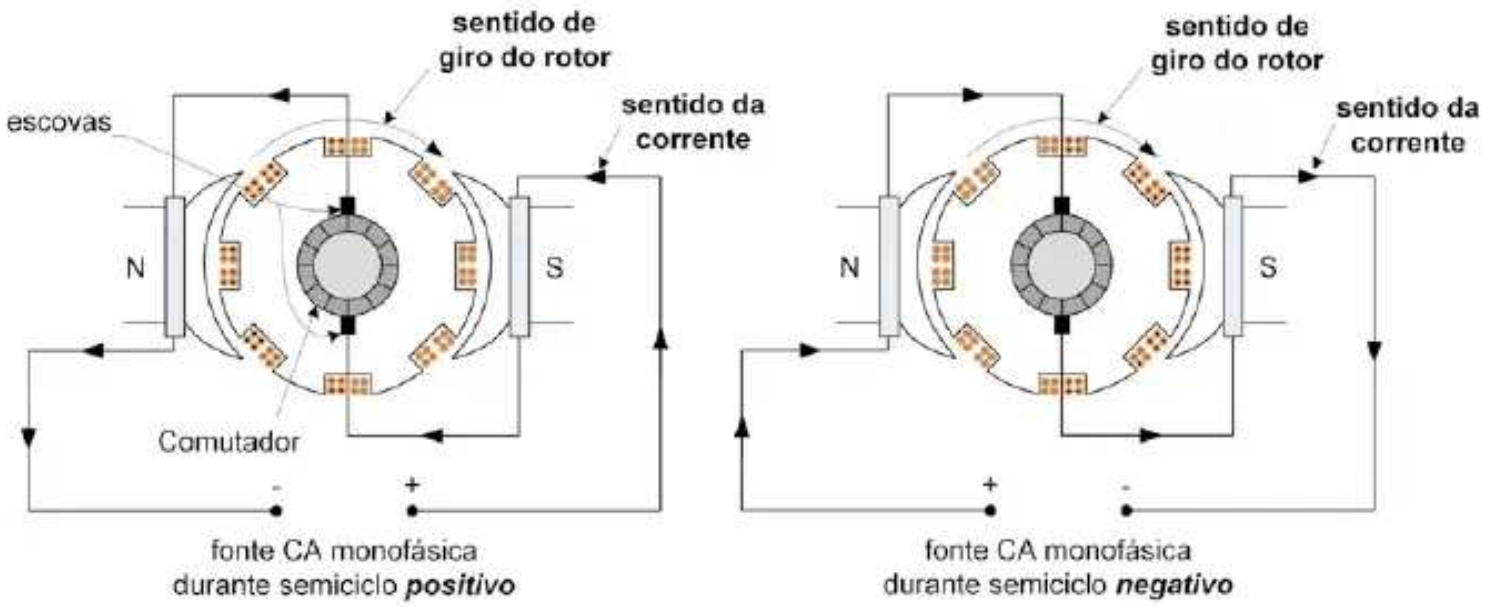


Figura 11 - Motor universal - sentidos das correntes / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma representação do motor universal dado em dois momentos, sendo no primeiro com alimentação monofásica CA durante o semiciclo positivo da tensão e seus respectivos sentidos de corrente e, no segundo momento, alimentação monofásica CA durante o semiciclo negativo da tensão e seus respectivos sentidos de corrente invertidos ao primeiro momento, porém mantendo-se o mesmo sentido de giro do rotor.

Neste momento, iremos utilizar nosso conhecimento adquirido até este momento para iniciar o estudo dos alternadores, assunto que terá maiores detalhes na próxima unidade, então vamos para as definições fundamentais começando pela lei de Lenz, dada em 1833, onde Heinrich Lenz determinou que: "a ação eletrodinâmica de uma corrente induzida opõe-se igualmente à ação mecânica que a induziu" (KOSOW, 2005, p. 10).

O físico estoniano **Heinrich Friedrich Emil Lenz** nasceu em 12 de fevereiro de 1804, em Tartu na Estônia, e faleceu em 10 de fevereiro de 1865, em Roma, Itália. A letra "L" dada ao símbolo do indutor é em sua homenagem L de Lenz.

Desta forma, fica estabelecido que uma f.e.m. induzida produzirá uma corrente em um determinado circuito fechado com sentido que se opõe

Figura 12 - Heinrich Friedrich Emil Lenz

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma ima-

à variação que a produziu, daí a causa e o efeito que se opõe à causa (KOSOW, 2005).

gem desenhada à mão em preto e branco de Heinrich Friedrich Emil Lenz.

Com base nesse conhecimento e nos estudos de máquinas síncronas que realizamos nas primeiras unidades deste livro, façamos a seguinte reflexão: "Em uma máquina elétrica, o torque eletromagnético desenvolvido na armadura, percorrido por uma corrente elétrica, tem ação de oposição à rotação do campo magnético do rotor em relação à armadura" (KOSOW, 2005, p. 164).

Esta análise é importante para que possamos iniciar os estudos desta máquina elétrica utilizada na geração de tensão alternada, denominada **alternador**. A Figura 13 mostra uma imagem de um alternador de pequeno porte utilizado em automóveis para nossa primeira análise.

Figura 13 - Alternador automotivo - vista em corte lateral

Descrição da Imagem: esta figura mostra a foto de um alternador automotivo com corte lateral para acesso visual aos principais componentes, como enrolamentos de estator e rotor, rotor, núcleo, rolamentos e carcaça com conexões.

De acordo com a lei de Lenz, muitos fenômenos relacionados a este tipo de máquina podem ser explicados. Os próximos passos serão a interpretação das **relações de tensões em máquinas CA**.

"A tensão induzida na armadura tem como resultado uma corrente de armadura com fase (em relação à tensão gerada pelo alternador) que depende do tipo de carga associada ao alternador".

Fonte: Kosow (2005, p. 164).

Em um alternador, a tensão gerada por fase é determinada pela Equação 1:

$$E_{gf} = \dot{V}_f + I_f \dot{Z}_f$$

Equação 1

Em que $\dot{V}_f$ é a tensão por fase nos terminais do alternador, já a relação $I_f \dot{Z}_f$ corresponde à queda de tensão na impedância interna do alternador.

Iremos considerar para nosso estudo a máquina síncrona que possui um campo girante e a armadura estacionária, que é utilizada em diversas aplicações, dadas pelos seguintes motivos:

- aumento da resistência dos dentes da armadura;
- redução da reatância da armadura;
- melhoria do isolamento;
- vantagens construtivas;
- número necessário de anéis coletores isolados;
- inércia do rotor reduzido; e
- vantagens na ventilação.

Quanto à construção das máquinas síncronas, leva em consideração a utilização de **rotores de polos não salientes** ou **polos cilíndricos**, pelo fato destes operarem com altas velocidades e, assim, pequeno número de polos, geralmente de 4 polos, já que a relação entre a frequência " f ", o número de polos " p " e a velocidade N_s em rpm é dada pela Equação 2, em que:

$$f = \frac{N_s \cdot p}{120} = [Hz]$$

Equação 2

Como parâmetro, podemos utilizar o Quadro 1 para alguns valores de frequências, velocidades e números de polos comercialmente utilizados.

Convido você estudante a acessar nosso podcast onde falo a respeito de GMG ou Grupo Motor Gerador utilizado em várias aplicações onde se justifica o uso de energia alternativa à rede da concessionária, seja por motivação de emergência ou para casos em que é mais viável economicamente.

Relações entre velocidade, frequência e número de polos em máquinas síncronas

Número de polos	Frequência desejada		
	25 Hz	50 Hz	60 Hz
2	1500 rpm	3000 rpm	3600 rpm
4	750	1500	1800
6	500	1000	1200
8	375	750	900
10	300	600	720
12	250	500	600
14	$214\frac{2}{7}$	$428\frac{4}{7}$	$514\frac{2}{7}$

	Frequência em Hz (ciclos por segundo)
	Velocidade em rotações por minuto (rpm)

Quadro 1 - Frequências, velocidades e número de polos/ Fonte: adaptado de Kosow (2005, p. 168).

REALIDADE AUMENTADA

GMG - Grupo Motor Gerador

O conteúdo dado pelo Quadro 1 nos permite analisar a relação entre a capacidade de velocidade do acionador da máquina síncrona e o número de polos que ela deve ter, assim, quando, por exemplo, a máquina síncrona for acoplada a uma turbina hidráulica utilizada por hidrelétricas, é necessário que a máquina tenha elevado número de polos, dessa forma há a possibilidade de operar com **rotor de polos salientes**, uma vez que a ventilação em baixas frequências não é um limitante.

Se, por outro lado, o acionador da máquina síncrona for um motor à combustão interna, à gasolina ou óleo diesel, por exemplo, opta-se por rotor de polos salientes com número de polos variando entre 4 e 12.

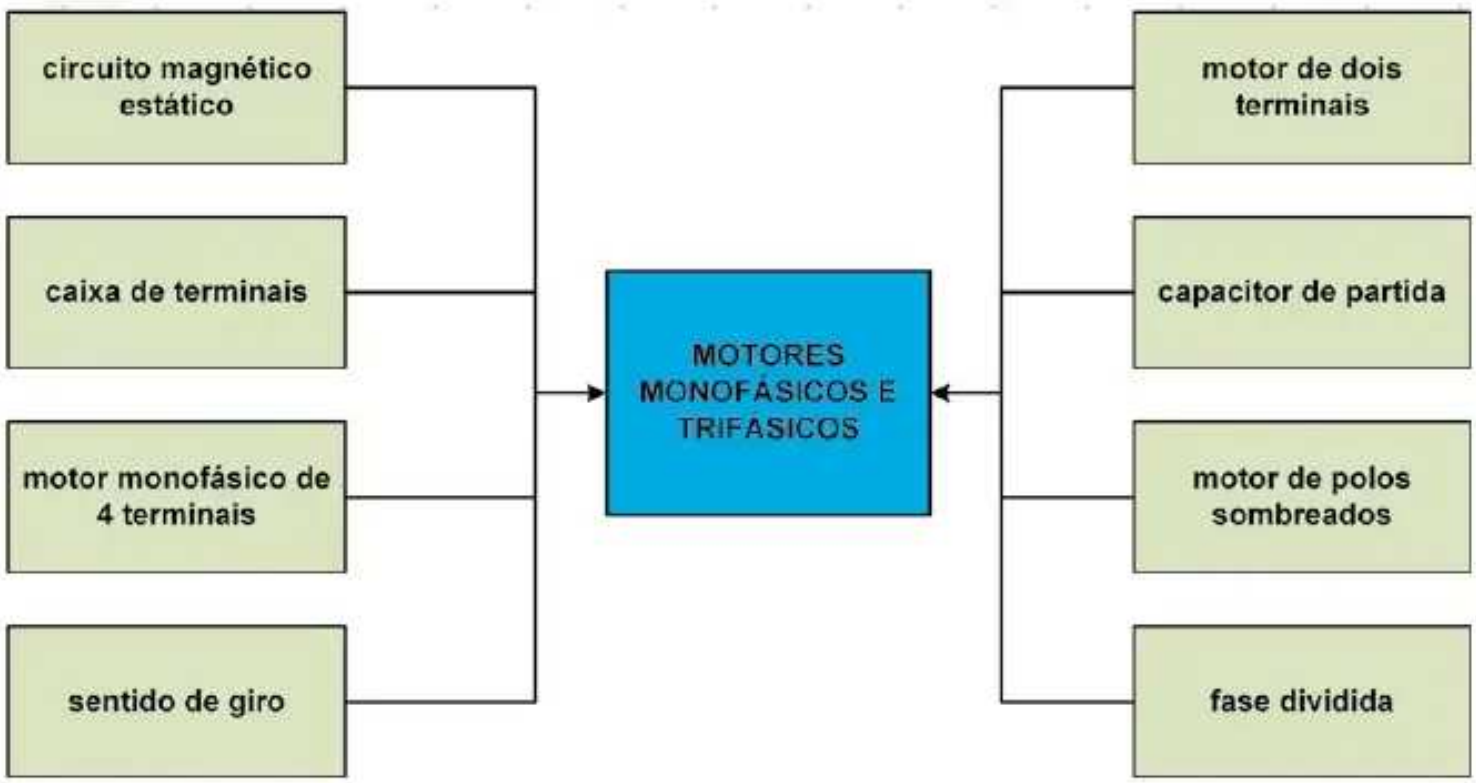
Lembre-se que para produzir a frequência de $60\ Hz$, utilizada pela maioria das cargas alimentadas pela rede elétrica no Brasil, será necessário optar pela máquina síncrona em função da velocidade que a fonte de movimento (acionador) possui, assim, determinando o número de polos dela.

Iremos abordar mais sobre alternadores em nossa próxima unidade, onde você já deve estar munido de conhecimento para interpretar as relações de potência que esta e outras máquinas representam.

O profissional Engenheiro Eletricista poderá encontrar o tema alternadores e motores monofásicos e trifásicos na maioria dos ambientes industriais modernos, pois a movimentação de cargas e funcionamento das máquinas depende de motores elétricos, que podem atuar em indústrias em geral, fabricantes de máquinas e equipamentos, ferramentas elétricas etc.

Já os alternadores ou as máquinas síncronas, propriamente dito, possuem aplicações principalmente em entrada de alimentação de indústrias e prédios administrativos, onde há a necessidade de gerar a própria energia principalmente em horários onde as tarifas de energia são mais dispendiosas.

Chegamos até esta etapa de nosso estudo e agora iremos resgatar o conhecimento adquirido por meio da leitura de um mapa conceitual, onde podemos ver sua convergência de termos com um termo comum relacionado aos motores elétricos trifásicos e monofásicos. A sugestão é que você revisite cada termo dado nesta unidade e preencha seu próprio mapa conceitual com o significado dos respectivos termos.



Descrição da Imagem: esta figura mostra o mapa conceitual com os principais termos desta unidade convergindo para o termo motores monofásicos e trifásicos, são os termos periféricos: circuito magnético estático, caixa de terminais, motor monofásico de 4 terminais, sentido de giro, motor de dois terminais, capacitor de partida, motor de polos sombreados e fase dividida.

MAPA MENTAL

1. Em um ambiente industrial, uma máquina síncrona de 4 polos atua na geração de energia elétrica com frequência de 60 Hz. Assinale a alternativa correta para o valor da velocidade do eixo do acionador para que a tensão seja produzida na saída do alternador com o referido valor de ciclos por segundo.
   a) $900\ rpm$.
   b) $1800\ rpm$.
   c) $2\ rpm$.
   d) $100\ rpm$.
   e) $3600\ rpm$.

2. Em uma máquina síncrona com queda de tensão interna do alternador de $7,3\ V$, qual será a tensão média gerada por fase na saída do alternador sabendo-se que a tensão por fase nos terminais do alternador varia entre $100\ V$ e $107\ V$?
   a) $254\ V$.
   b) $24\ V$.
   c) $13,8\ V$.
   d) $127\ V$.
   e) $110,8\ V$.

3. Um motor monofásico de 2 CV utiliza capacitores para aumentar o torque de partida, porém, após a partida, é necessário manter o torque para sustentar a carga. Assinale a alternativa correta que apresenta o motor monofásico com maior torque de partida e em regime de serviço:
   a) Motor de dois capacitores.
   b) Motor de capacitor de partida.
   c) Motor de polos sombreados.
   d) Motor universal.
   e) Motor de rotor bobinado.

Máquinas de Indução Polifásicas e Análise de Potência em Máquinas Elétricas

Me. Fábio Augusto Gentilin

OPORTUNIDADES DE APRENDIZAGEM

Nesta unidade, o estudante terá a oportunidade de aprender sobre máquinas de indução polifásicas, suas relações de potência, torque e demais parâmetros funcionais que permitem o entendimento do funcionamento de motores e alternadores desempenhando suas funções específicas com aplicações típicas e situações onde se faz necessário a aplicação de potência mecânica por acionamento elétrico.

Você já fez um suco de frutas utilizando um liquidificador? Ou cortou gramas utilizando um cortador de gramas elétrico? Ou mesmo espremeu frutas com aquele espremedor de frutas bem limitado? Se já fez alguma dessas peripécias, deve ter aprendido que existe algo em comum entre cada uma das tarefas que utilizam motor elétrico para ser realizada: o conjugado. Este parâmetro, em poucas palavras, é responsável pela capacidade que um campo magnético tem em realizar esforço mecânico e depende de vários parâmetros.

E você? Sabe por que o liquidificador sofre ao tentar quebrar os cubos de gelo ou a fruta daquele suco que está preparando, ou quando você está com a grama mais alta e está com pouco tempo para cortar e tenta forçar a máquina a entrar mais rápido nas folhas, por que a rotação diminui? A mesma pergunta vale para o espremedor de frutas quando apertamos demais uma laranja contra ele e simplesmente para de girar. Você sabe o porquê dessa reação em comum nos três casos?

A construção de máquinas elétricas depende de diversos fatores, que podem ir desde os materiais utilizados nos núcleos até topologia de funcionamento, dimensionamento mecânico e elétrico, torque etc. A adequação da máquina elétrica à sua função depende de análise eletromecânica que relaciona as potências de entrada e de saída, assim, quando um motor utilizado em um liquidificador de uso doméstico é dimensionado para oferecer uma potência de 800 W, significa que pode atingir este parâmetro de maneira segura desde que a potência fornecida em sua entrada atenda a esta demanda e, ao mesmo tempo, que o regime de serviço seja respeitado para produzir determinado conjugado de partida que possa então romper o momento de inércia oferecido pela carga, representado pelo alimento (frutas, gelo etc.) que é submetido ao equipamento.

Ao analisar outros exemplos de máquinas elétricas usuais em nosso meio, como as já citadas cortadores de grama elétricos, espremedores de frutas ou mesmo furadeiras elétricas, serras, lixadeiras, entre outros, observamos uma característica comum entre eles que está relacionado com a alimentação monofásica, pois adequa-se ao uso doméstico e, portanto, além de manuais, esses equipamentos devem ser seguros ao uso e ao mesmo tempo para a rede elétrica que os alimenta, assim encontramos muitos eletrodomésticos com motores para uso manual com potências que não

vão muito longe dos 1000 W, pois, caso contrário, a maioria das pessoas não conseguiria utilizar, dado ao esforço mecânico que teriam que realizar ao segurar a ferramenta, além do desbalanceamento que ela causaria à rede monofásica se pudesse produzir 10000 W, por exemplo, em regime estacionário.

Analisar o comportamento de máquinas é tão importante quanto analisar o porquê de suas limitações, logo, nesta unidade iremos relacionar pontos fundamentais para sua formação em Engenharia Elétrica que interagem diretamente com a potência dessas máquinas, sejam elas motores ou alternadores.

Neste momento, convido você a realizar uma atividade prática com o objetivo de observar o comportamento do conjugado de máquinas elétricas e para isso podemos utilizar um eletrodoméstico que você tenha acesso em sua casa ou trabalho, de tal forma que você possa submetê-lo ao regime normal de trabalho e aumentar sua carga gradativamente até notar que a rotação de seu eixo diminua em função da carga aplicada.

Para realizar esta experimentação, você pode utilizar uma furadeira, liquidificador, espremedor de frutas ou qualquer outra máquina elétrica monofásica que permita a manipulação da carga aplicada ao eixo, sendo que esta não depende de alimentação exclusivamente da rede elétrica, ou seja, pode ser alimentada por bateria também.

De posse da máquina escolhida, você deve submetê-la ao regime de serviço e aplicar esforço gradativo lentamente para que ela possa se autorregular e tentar vencer o esforço aplicado e, em seguida, aumente mais a intensidade por curto intervalo de tempo (afinal, não queremos danificar o equipamento, apenas observar o fenômeno) e perceba em que momento ela inicia a diminuição do giro de seu eixo.

Quando a máquina já inicia a diminuição de sua capacidade em girar, tende a atingir a velocidade zero e causar aquecimento ao enrolamento que a alimenta, pois o fluxo produzido para causar movimento, função da corrente nas bobinas, não está sendo capaz de atuar o rotor; observe brevemente quando o motor para de funcionar e em qual intensidade de esforço.

Vamos agora realizar uma reflexão a respeito do experimento realizado utilizando um pouco de instrumentação, de forma que experimentalmente observássemos a força real aplicada no esforço.

De posse de uma pequena balança eletrônica de cozinha, podemos aplicar esforço em seu prato e observar que o indicador sofre alterações, pois uma força está sendo aplicada e seu sensor detecta e converte esta intensidade em sinal elétrico para posterior processamento e indicação no mostrador digital.

De posse desta balança, iremos utilizá-la para pressionar a metade de uma laranja contra a castanha do espremedor de frutas, de forma que a força aplicada nesta tarefa seja indicada em seu mostrador, lembrando que a balança mede a massa de um corpo em kg e desejamos saber a força (F) aqui definida como peso " P ", que depende da massa e da aceleração da gravidade, onde $F = P = m.g = [N]$ ($g = 9{,}80665\ m/s^2$), daí a necessidade de conversões para que a força em estudo seja considerada aqui como sendo grosseiramente igual ao peso (desconsiderando outros fatores externos, apenas para fins didáticos práticos, e utilizando o que está ao alcance dos estudantes).

Ao realizar o teste de esforço, pressionando-se a laranja com o prato da balança contra o espremedor, tomando o devido cuidado de manter a base da balança reta com o uso de uma superfície plana, observa-se a variação de seu indicador, de tal forma que podemos avaliar a amplitude de esforço mínimo para acionar o espremedor, o esforço de regime contínuo, além disso, os momentos em que ocorrem o início da desaceleração do motor e finalmente o instante em que ele desliga por não conseguir atender à exigência de potência.

Ao realizar este teste, anote cada um dos valores de força que encontrou (calculando a massa pela aceleração em cada caso) com o uso da balança, que tem caráter referencial neste estudo, apenas para que possa mensurar e registrar os resultados de sua atividade.

Caso tenha à sua disposição um alicate amperímetro, utilize-o em conjunto com o experimento dado acima e verifique e anote em seu Diário de Bordo os valores da **força** e a **intensidade da corrente elétrica** em cada caso, associando-se

- Corrente de início de funcionamento (partida do motor).
- Corrente em regime de serviço (operação normal).
- Corrente onde ocorre a diminuição do torque do motor (ponto inicial da perda de velocidade do eixo).
- O valor da corrente quando o motor desliga totalmente (faça isso rapidamente para evitar danos ao espremedor).

Ao final do experimento, desenhe o gráfico que relaciona a corrente em ampères com a força aplicada no espremedor e conclua em que momento ocorre a inflexão da curva que torna o equipamento sem capacidade de realizar esforço mecânico.

Os resultados de seu experimento devem ser próximos destes dados:

massa (kg)	força (N)	corrente (A)
1	9,81	0,2
1,2	11,77	0,33
1,5	14,71	0,46
1,8	17,65	0,59
2,05	20,10	0,72
2,32	22,75	0,85
2,59	25,40	0,98
2,86	28,05	1,11
3,13	30,69	2
3,4	33,34	3,5
3,67	35,99	3,7
3,94	38,64	3,8
4,21	41,29	3,8
4,48	43,93	3,85
4,75	46,58	3,87

Quadro 1 - Valores de massa, força e peso do experimento

Fonte: o autor.

peso e corrente nas situações:

O gráfico plotado dos dados de corrente em função da força pode ser visualizado na Figura 1. Observe o comportamento do equipamento durante a aplicação de força variável (ignorando-se o pico de corrente que se dá na partida da máquina).

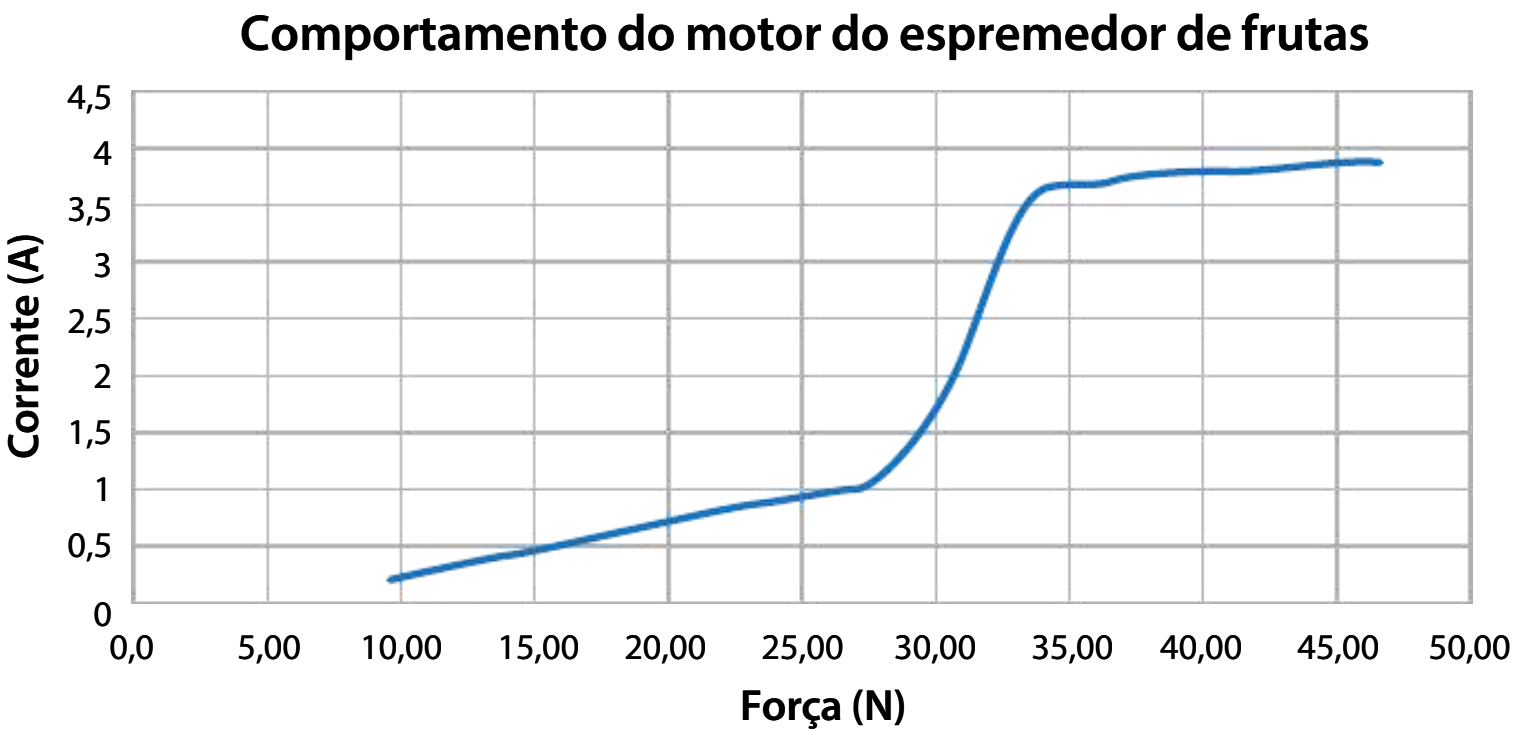


Figura 1 - Gráfico da corrente em função da força do experimento / Fonte: o autor.

Descrição da Imagem: esta figura mostra um gráfico que relaciona a corrente elétrica que circula pelas bobinas do motor do espremedor de frutas variando com a intensidade de força aplicada desde sua partida até o momento em que o eixo para de girar, com escalas variando entre 0 e 4,5 A para a corrente e 0 a 50 N para a força. O comportamento gráfico da curva produzida apresenta região linear entre 10 e 25 N com corrente variando de 0,2 até 1 A, onde ocorre uma inflexão dele para 3,7 A estabilizando-se em torno de 34 A, com 3,8 e 3,9 A, permanecendo assim para valores de força acima de 35 N.

DIÁRIO DE BORDO

Chegamos ao ponto de nosso estudo que nos permite analisar as relações de potência em máquinas elétricas, sendo elas motores ou alternadores (que atuam na geração de energia elétrica).

Para iniciar nosso estudo, seguem as relações mais importantes e que serão necessárias para o entendimento da dinâmica desta unidade. Começamos pela energia armazenada em um campo magnético, em que a variação de sua densidade pode ser calculada por:

$$\frac{\Delta E}{\overline{Vol}^{mag}} = \int H \ dB$$

Equação 1

Esta relação nos informa que, em uma estrutura excitada com intensidade de campo magnético variando entre 0 e H , além de seu proporcional fluxo magnético B , por meio da permeabilidade magnética "μ", temos que a integral da Equação 1 fica (FALCONE, 2018):

$$\frac{\Delta E_{mag}}{Vol} = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$

Equação 2

Na Equação 2, E_{mag} representa a **variação de energia armazenada** onde o campo magnético varia de 0 até H, Vol é o volume e B é a densidade de fluxo magnético.

Podemos considerar que, quando B apresentar o mesmo valor em um material ferromagnético de alta permeabilidade que no ar, a densidade no ar será muito maior:

$$E_{mag} = \frac{1}{2} BH\ Vol$$

Equação 3

Para o caso específico no qual temos dois circuitos elétricos onde cada um possui indutância individual L_{11} e L_{22}, porém, com mútua indutância "M", a energia armazenada é calculada por (FALCONE, 2018):

$$E_{mag} = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 + M i_1 i_2$$

Equação 4

Quando estudamos o campo elétrico, também devemos determinar a energia armazenada no campo elétrico "E_{elet}", onde, para o campo elétrico E, fica:

$$\frac{\Delta E_{elet}}{Vol} = \int E\ dD$$

Equação 5

Equação onde temos D que representa a **densidade de carga elétrica** enquanto E é a **intensidade de campo elétrico**. Sabendo-se que:

$$D = \varepsilon E$$

Equação 6

Então podemos afirmar que:

$$\frac{\Delta E_{elet}}{Vol} = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} \frac{D^2}{\varepsilon}$$

Equação 7

Em que ε é a constante dielétrica do meio por onde se propaga o campo elétrico.

Já nos elementos mecânicos, também temos armazenamento de energia quando ocorre deslocamento angular ou translação, de modo que ΔE_{mec} é a **energia arma-**

zenada ou **energia potencial das molas** e que pode ser calculada por:
Em termos de conjugado "C":

$$\Delta E_e = \int C(\alpha)\, d\alpha$$

Equação 8
Em termos de força "f":

$$\Delta E_e = \int f(x)\, dx$$

Equação 9

Assim, quando um elemento de máquina como, por exemplo, um eixo de torção, é solicitado em regime elástico, temos os coeficientes de elasticidade constantes. Daí o conjugado e a força dados por:

$$C(\alpha) = k_t \alpha$$
Equação 10
$$f(x) = kx$$
Equação 11

Já nos elementos de inércia, a energia armazenada pode ser calculada por:

$$\Delta E_{cin} = \int J\Omega\, d\Omega$$
Equação 12

Em que J é o momento de inércia dado em kgm^2.

Como estamos estudando as relações de forças e potência e o processo de conversão eletromecânica de energia atua com potência elétrica e mecânica, devemos entender as forças e conjugados em sistemas onde há campo magnético, definindo então a lei da **força de *Lorentz***, a qual determina que:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$
Equação 13

Onde $\vec{F}$ é a força (medida em N) contida em uma carga "q" (dada em C) imersa em um campo elétrico e magnético. **Já a intensidade de campo elétrico** $\vec{E}$ é dada em v/m, a velocidade da partícula relativa ao campo magnético "$\vec{v}$" é medida em m/s e a densidade de fluxo "$\vec{B}$" é medida em T.

Quando o sistema é dotado **apenas de campo elétrico**, a força pode ser calculada

Quando o sistema é dotado **apenas de campo elétrico**, a força pode ser calculada apenas pela carga da partícula, pois $\vec{B} = 0$, logo, a força atua na direção de $\vec{E}$, independentemente de qualquer movimento da partícula, nessas condições, fica:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Equação 14

Por outro lado, quando o sistema apresenta características puramente magnéticas, temos que $\vec{E} = 0$, logo, restam apenas as componentes de fluxo, velocidade e carga q, assim:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Equação 15

Considera-se as grandezas q e $\vec{B}$ em módulo.

É importante salientar que a direção da força é sempre perpendicular à direção do campo magnético e também à velocidade da partícula, o que nós podemos observar no produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$.

Isso explica o fundamento da "**regra da mão direita**", dado que o módulo do produto vetorial citado é igual ao produto dos módulos $\vec{v}$ e $\vec{B}$ e do seno do ângulo entre essas relações, daí assumindo-se o polegar da mão direita de uma pessoa aponta para $\vec{v}$ e o indicador aponta para $\vec{B}$, logo, a direção de $\vec{F}$ é dada pelo dedo do meio ou, pela palma da mão.

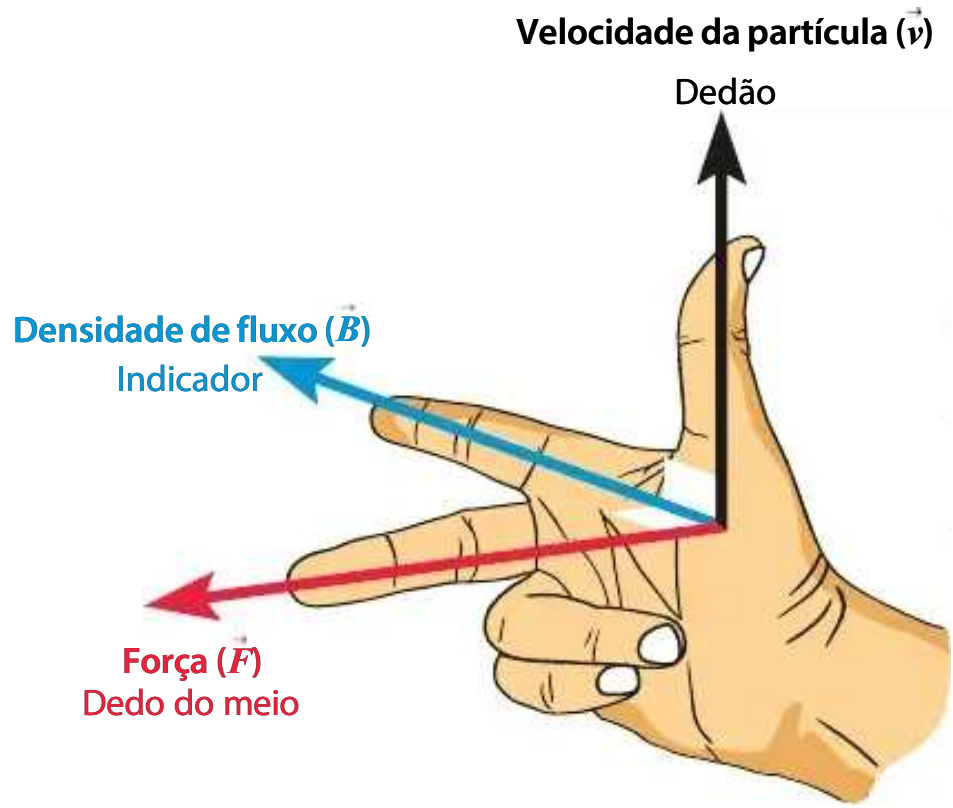


Figura 2 - Regra da mão direita - sentido da força de Lorentz

Descrição da Imagem: esta figura mostra uma representação da regra da mão direita para a de-

terminação do sentido da força de Lorentz, em que, sobre o desenho de uma mão direita de uma pessoa, são desenhados os eixos que definem a velocidade da partícula ($\vec{v}$), a densidade de fluxo ($\vec{B}$) e a Força ($\vec{F}$), representados pelo dedão, dedo indicador e dedo do meio, respectivamente.

Para uma grande quantidade de partículas com cargas em movimento, precisamos adequar a Equação 13 em termos de densidade de carga (ρ), dessa forma, a Equação 13 fica (Equação 16):

$$\vec{F}_V = \rho(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Equação 16

Sendo $\vec{F}_V$ a **força aplicada por unidade de volume** (logo o subscrito " $_V$ " de volume), onde sua unidade de medida é $\frac{N}{m^2}$. Já o produto:

$$\vec{J} = \rho\vec{v}$$

Equação 17

É a densidade de corrente, medido em $\frac{A}{m}$. Assim, a densidade de força $\vec{F_v}$ é calculada como sendo:

$$\vec{F_v} = \vec{J} \times \vec{B}$$

Equação 18

Esta equação é de extrema importância prática, pois pode ser utilizada para encontrar a densidade de força que atua sobre o material do condutor que está conduzindo uma determinada corrente elétrica, por exemplo, em um motor cujo rotor possui condutores conduzindo correntes, estes que estão imersos em campo magnético e então sujeitos a forças que, dado a sua condição geométrica e fixados a um eixo, podem deixar a inércia e promover o movimento angular do rotor.

Talvez este seja um dos princípios mais importantes a serem estudados para entender o porquê da origem do movimento de um eixo em uma máquina elétrica. A Figura 3 mostra uma representação onde podemos observar os condutores de um rotor sendo percorridos pela corrente "i" entrando e saindo, além de estar sujeito ao campo magnético que está cortando sua estrutura de forma perpendicular.

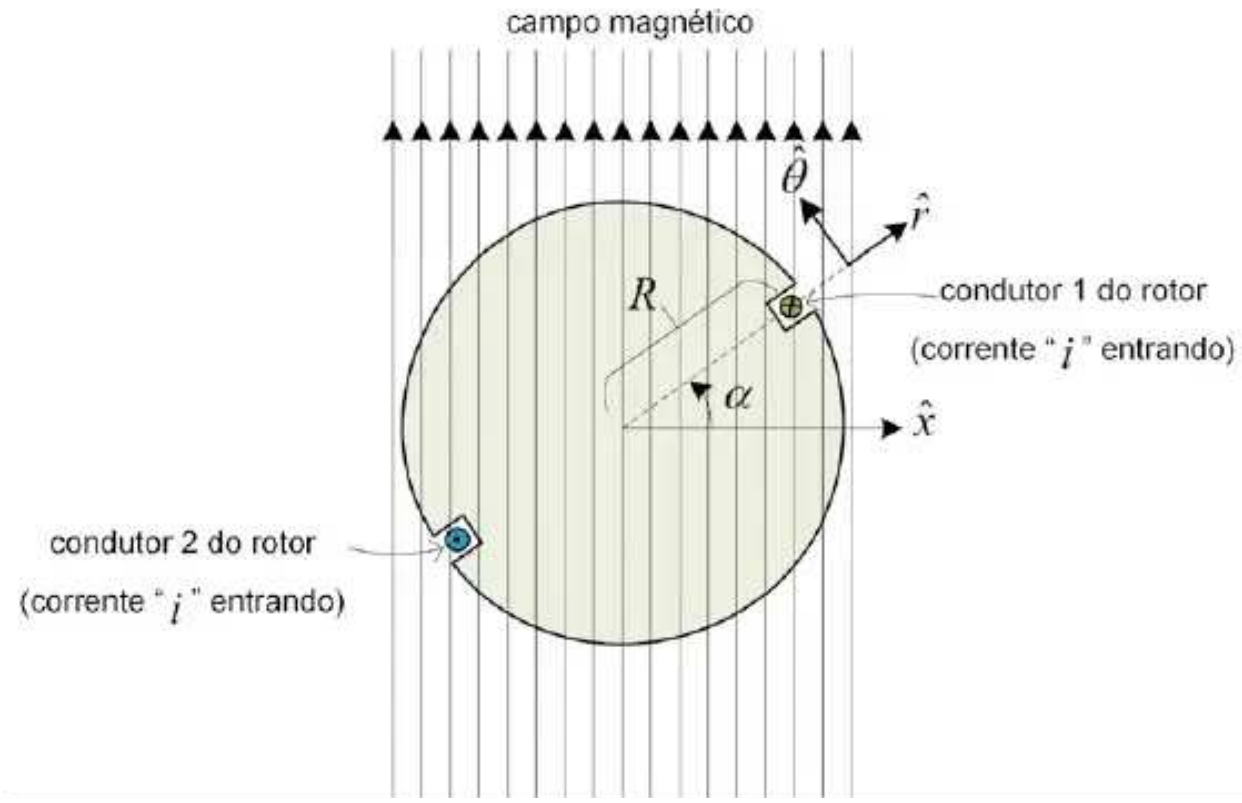


Figura 3 - Rotor e seus condutores imersos em campo magnético / Fonte: adaptada de Umans (2014).

Descrição da Imagem: esta figura mostra o rotor de um motor submetido ao campo magnético uniforme e os condutores do rotor com corrente entrando e saindo, com a representação do ângulo α que representa a posição do rotor e também as linhas de campo, além do raio entre a posição dos condutores e o centro do eixo.

A velocidade de giro do eixo de uma máquina polifásica dada em rpm pode ser determinada em termos do escorregamento s e da velocidade síncrona "n_s", sendo:

$$n = (1-s)n_s$$

Equação 19

Lembrando que o escorregamento pode ser obtido alternativamente relacionando as velocidades síncrona e do eixo da máquina, onde temos que:

$$s = (n_s - n)/n_s$$

Equação 20

Onde n_s é a velocidade síncrona e n é a velocidade do eixo da máquina.

Do mesmo modo, a velocidade angular ω_m do eixo pode ser expressa em termos de ω_s (velocidade síncrona angular) e do escorregamento:

$$\omega_m = (1-s)\omega_s$$

Equação 21

Além disso, temos que o movimento relativo entre o fluxo magnético do estator e os condutores do rotor induz frequência de escorregamento f_r que depende de:

$$f_r = sf_e$$

Equação 22

Em máquinas rotativas, há o surgimento de uma força que atua sobre os condutores do rotor causando movimento, porém este é livre para girar, entretanto, qual será o efeito deste fenômeno sobre os condutores que transmitem e distribuem energia elétrica e são fixos?

Considerando-se uma máquina polifásica com enrolamentos do estator iguais e, portanto, simétricos, com fluxo magnético síncrono girante no entreferro, este que produz f.c.e.m.s (forças contraeletromotrizes) nas fases do estator, considerando-se a queda de tensão por dispersão no estator dada na Equação 23, resulta que a tensão nominal em seus terminais é diferente da f.c.e.m.:

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1)$$

Equação 23

Onde

$\hat{V}_1$: Tensão de fase entre os terminais do estator

$\hat{E}_2$: f.c.e.m. gerada pelo fluxo de entreferro resultante em cada fase

$\hat{I}_1$: Corrente no estator

R_1 : Resistência efetiva do estator

X_1 : Reatância de dispersão do estator

A Figura 4 mostra o circuito equivalente do estator de uma máquina polifásica. Observe, estudante, cada componente de sua composição assim como na descrição de cada termo que estudamos anteriormente.

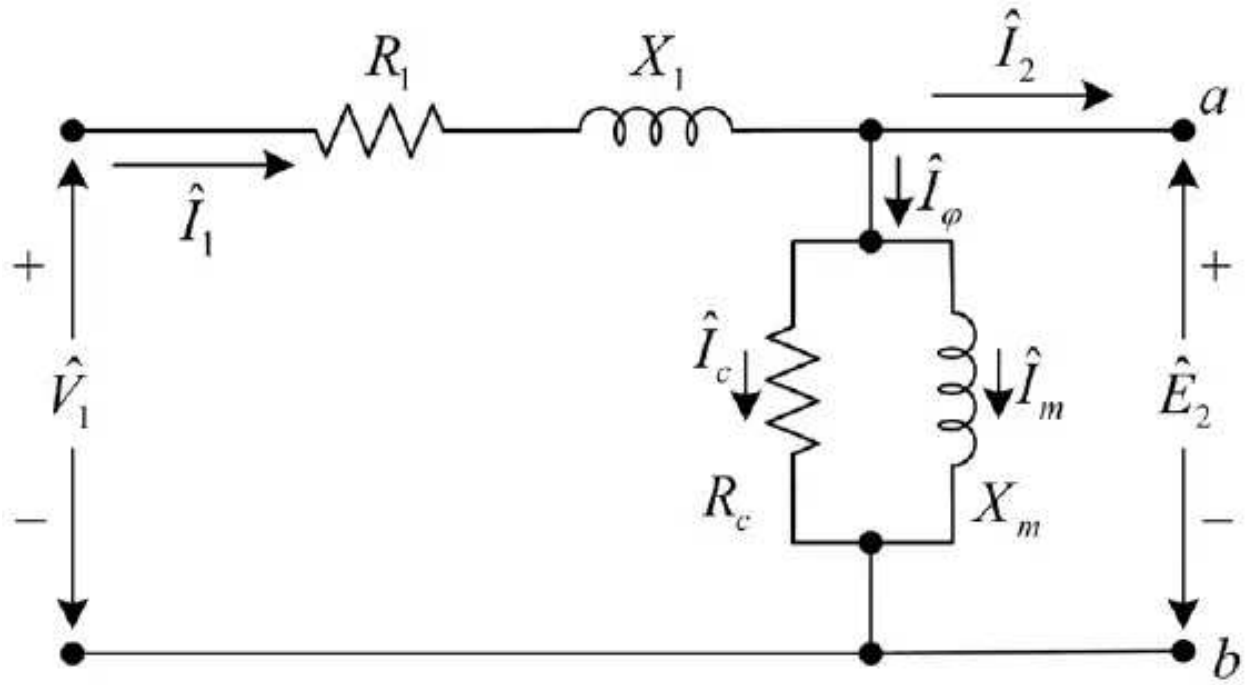


Figura 4 - Circuito equivalente do estator de um motor de indução polifásico / Fonte: adaptada de Umans (2014).

Descrição da Imagem: esta figura mostra o circuito equivalente do estator de um motor de indução polifásico onde temos a tensão $\hat{V}_1$ em sua entrada e os elementos R_1, X_1, R_c e X_m, além de correntes circulantes por eles e da tensão $\hat{E}_2$ em seus terminais.

Iremos aqui decompor as componentes de corrente do estator em duas componentes, sendo: corrente de carga e corrente de excitação ou magnetização, onde a componente de carga $\hat{I}_2$ é a produtora de f.m.m. do rotor, já a componente de excitação vamos representar por $\hat{I}_\varphi$ (que divide-se entre $\hat{I}_c$ e $\hat{I}_m$), esta que produz o fluxo de entreferro resultante e é função da f.e.m. $\hat{E}_2$. A corrente $\hat{I}_c$ é conhecida como componente de perdas no núcleo e está em fase com $\hat{E}_2$, já a componente de magnetização $\hat{I}_m$ é atrasada em relação à $\hat{E}_2$ de $90°$.

Após analisar o estator, podemos analisar agora o rotor desta máquina polifásica, sendo representado como uma impedância Z_2 dada na Equação 24:

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2}$$

Equação 24

Esta impedância Z_2 corresponde à impedância de dispersão de um circuito secundário estacionário, o que permite utilizar o mesmo raciocínio utilizado para analisar um transformador.

Para calcular Z_2 podemos aproximar que esta impedância se relaciona à impedância de um curto-circuito, já que seus condutores estão nesta condição no rotor, entretanto, podemos escrever matematicamente assim:

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = N_{ef}^2 \left(\frac{\hat{E}_{rotor}}{\hat{I}_{rotor}} \right) = N_{ef}^2 Z_{rotor}$$

Equação 25

Em que N_{ef} é a relação de espiras entre o estator e o rotor do motor.

O próximo passo de nossa análise é levar em consideração o movimento relativo entre rotor e estator, em que iremos adotar um rotor estacionário que apresenta as tensões e correntes na frequência deste estator.

Para este caso, iremos considerar a impedância de dispersão do rotor como sendo:

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = R_2 + jsX_2$$

Equação 26

Onde R_2 é a resistência do rotor e sX_2 é a reatância de dispersão do rotor na frequência de escorregamento.

Nesta análise, consideramos que a soma fasorial das correntes do estator e da corrente do rotor determinam a f.m.m. resultante no entreferro. Acrescentando-se a componente do escorregamento "s" à nossa análise, podemos afirmar que a impedância oferecida pelo rotor é dada por:

Da Equação 24, podemos incluir o escorregamento e temos a Equação 27:

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2$$

Equação 27

Com isso, temos como determinar a impedância do rotor estacionário Z_2, assim, como em um transformador o enrolamento primário sofre influência direta da corrente no enrolamento secundário, no motor de indução o estator responde à dinâmica imposta ao rotor, sendo, em resumo, definida como seu regime de serviço real.

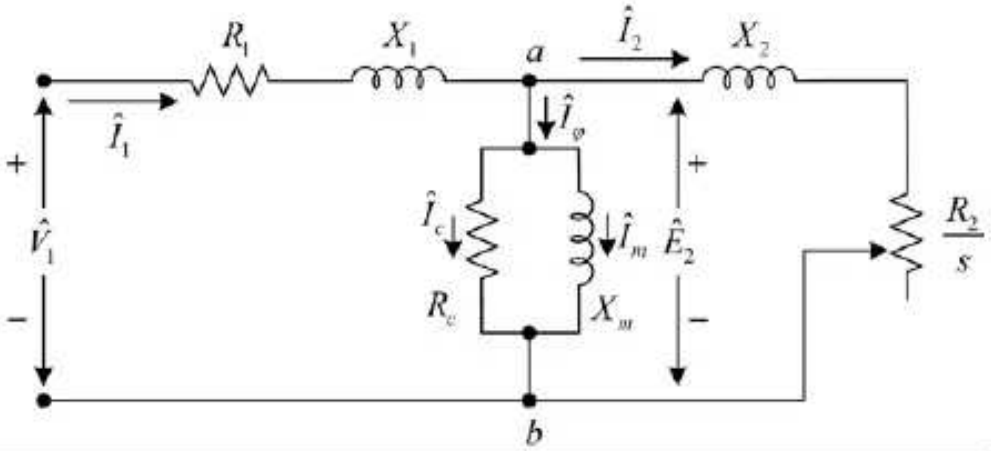


Figura 5 - Circuito equivalente de um motor de indução polifásico
Fonte: Umans (2014, p. 354).

Descrição da Imagem: esta figura mostra o circuito equivalente de um motor de indução polifásico onde temos a tensão $\hat{V}_1$ em sua entrada e os elementos R_1, X_1, R e X_m, além de correntes circulantes por eles e da tensão $\hat{E}_2$ em seus terminais e também o estator, como sua componente de carga e o escorregamento s.

Olá, estudante! Convido você para acessar este Podcast em que trarei um assunto muito interessante relacionado aos motores elétricos de indução: é o acionamento utilizando-se inversor de frequência, onde falarei sobre controle escalar e vetorial e suas componentes de corrente, tensão e frequência.

Para aprofundar nosso estudo, iremos analisar o circuito em termos de potência transferida pelo entreferro da máquina, onde P_g é a **potência total transferida ao rotor da máquina** e pode ser calculada através da Equação 28:

$$P_g = qI_2^2\left(\frac{R_2}{s}\right)$$

Equação 28

Sendo q o número de fases do estator.

Como já era de se esperar, da mesma forma que calculamos perdas nos transformadores, nas máquinas dinâmicas também calculamos as perdas que, no caso do motor de indução polifásico, é dado por " P_{rotor} ", que corresponde à potência dissipada no rotor, onde:

$$P_{rotor} = qI_2^2R_2$$

Equação 29

Finalmente podemos então calcular a **potência eletromagnética** (P_{mec}) desenvolvida pelo motor que é a diferença entre a **potência total transferida ao rotor da máquina** (P_g) e a **potência dissipada no rotor** (P_{rotor}) (UMANS, 2014):

$$P_{mec} = P_g - P_{rotor} = \left[qI_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \right] - \left(qI_2^2 R_2 \right)$$

Equação 30

O que equivale a:

$$P_{mec} = qI_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$$

Equação 31

Combinando a Equação 28 com a Equação 31, temos a Equação 32:

$$P_{mec} = (1-s) P_g$$

Equação 32

E também, a potência do rotor é dada por:

$$P_{rotor} = sP_g$$

Equação 33

Dado que, do total da potência transferida pelo entreferro, temos uma fração que é convertida em potência mecânica $(1-s)$ e a outra parcela em potência dissipada "s", ou perdas no rotor. Para dimensionar a potência dissipada no rotor, devemos utilizar a Equação 34:

$$P_{rotor} = \left(\frac{s}{1-s} \right) P_{mec}$$

Equação 34

Como resultado, podemos adaptar o circuito equivalente para (Figura 6):

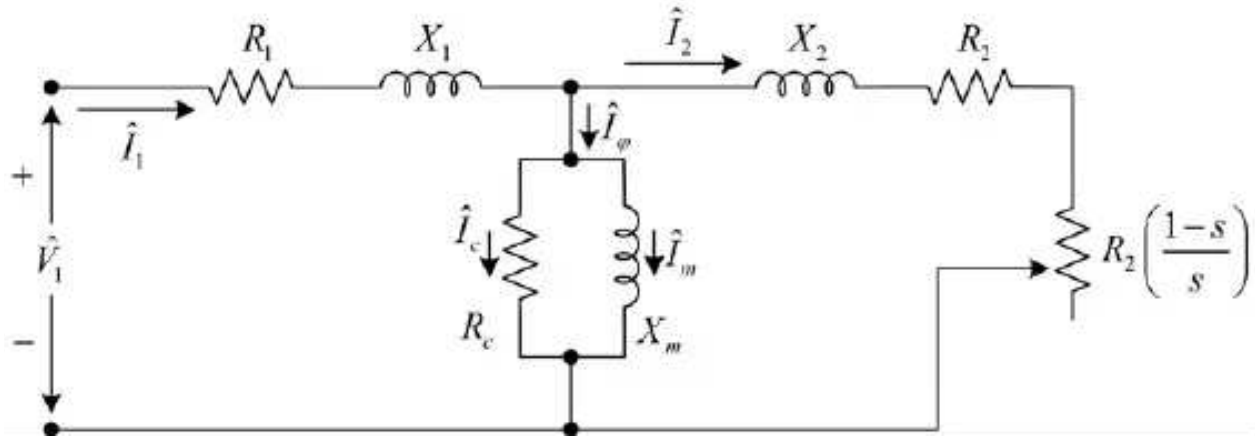


Figura 6 - Circuito equivalente alternativo do motor de indução polifásico / Fonte: adaptada de Umans (2014).

Descrição da Imagem: esta figura mostra o circuito equivalente de um motor de indução polifásico onde temos a tensão em sua entrada e seus elementos funcionais, além das correntes circulantes por eles, inclusive sua componente de carga e o escorregamento descrevendo as relações de carga representado pelo rotor.

Com dados da potência elétrica de nosso motor, agora podemos calcular parâmetros funcionais mecânicos, como o **conjugado eletromecânico** "T_{mec}", que corresponde à P_{mec}, que corresponde ao produto de T_{mec} pela **velocidade angular** "ω_m", logo:

$$P_{mec} = T_{mec}\omega_m = (1-s)\omega_s T_{mec}$$

Equação 35

Em que ω_s é a **velocidade síncrona angular** dada em $^{rad}/_{s}$, P_{mec} em W e T_{mec} medido em $^{N}/_{m}$. Assim, fica:

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{qI_2^2\left(^{R2}/_{s}\right)}{\omega_s}$$

Equação 36

Onde:

$$\omega_s = \left(\frac{2}{p}\right)\omega_e$$

Equação 37

Em que ω_e é a frequência elétrica f_e dada em rad/s e " p " é o número de polos, assim:

$$\omega_e = 2\pi f_e$$

Equação 38

Desta forma, para adequar a Equação 36 em termos da frequência elétrica, temos que:

$$T_{mec} = \left(\frac{p}{2\omega_e}\right) q I_2^2 \left(R_2/s\right)$$

Equação 39

Contudo, ainda não temos como informar que este é o conjugado final entregue pelo eixo do motor, pois para isso teríamos que estimar também outros fatores, por exemplo, a ventilação, o atrito, além de perdas suplementares, que podem ser subtraídas de T_{mec} ou de P_{mec}. Desta forma, a potência no eixo do motor " P_{eixo} " fica:

$$P_{eixo} = P_{mec} - P_{rot}$$

Equação 40

Logo,

$$T_{eixo} = \frac{P_{eixo}}{\omega_m} = T_{mec} - T_{rot}$$

Equação 41

Onde P_{rot} e T_{rot} são, respectivamente, a potência e o conjugado vinculados ao atrito, ventilação e outras perdas do rotor em seu funcionamento pleno.

Vamos agora apresentar um exemplo aplicado para você entender os passos para determinar a potência dissipada no rotor de um motor.

Exemplo resolvido:

Dado um motor de indução trifásico de 4 polos, com velocidade do eixo real de $1750\ rpm$, alimentado em $220\ V$ com frequência de $60\ Hz$, consome potência da rede de $10,7\ kW$ com corrente de $48,63\ A$. Considerando-se a resistência do estator de $0,2\ \Omega/\ fase$, determine a potência dissipada no rotor.

1º passo:
Cálculo da potência dissipada no enrolamento do estator:

$$P_{estator} = 3I_1^2 R_1 = 3(48,63)^2 0,2 = 1.418\ W$$

2º passo:
Cálculo da potência no entreferro:

$$P_g = P_{entrada} - P_{estator} = 10700 - 1418 = 9,282\ kW$$

3º passo:
Cálculo da velocidade síncrona:

$$n_s = \left(\frac{120}{p}\right) f_e = \left(\frac{120}{4}\right) 60 = 1800\ rpm$$

4º passo:
Cálculo do escorregamento:

$$s = (n_s - n) / n_s = (1800 - 1750) / 1800 = 0,027$$

5º passo:
Cálculo da potência do rotor:

$$P_{rotor} = sP_g = 0,0277.10,7.10^3 = 297,22\ W$$

Para dimensionar um motor, é necessário conhecer o momento de inércia representado pela carga que o motor irá acionar mecanicamente, assim, o motor a ser aplicado terá maior aproveitamento e dificilmente representará potência reativa em excesso para a instalação. Este procedimento visa a melhoria do fator de potência da carga.

Um parâmetro muito importante é o cálculo do rendimento em máquinas elétricas, que é a relação entre a potência de saída do motor (eixo) e a potência em sua entrada de alimentação elétrica (rede). Assim, o rendimento "η", fica:

$$\eta = \frac{P_{eixo}}{P_{in}}$$

Equação 42

No caso específico de **motores**, podemos obter o rendimento a partir da relação (KOSOW, 2005):

$$\eta = \frac{(P_{in} - P_{perdas})}{P_{in}}$$

Equação 43

Em termos de **geradores**, o cálculo do rendimento fica:

$$\eta = \frac{P_{eixo}}{P_{eixo} + P_{perdas}}$$

Equação 44

Onde P_{perdas} representa a soma de todas as potências individuais das perdas na máquina, seja por atrito, dispersão, ventilação etc.

Vamos agora resgatar um assunto que iniciamos na unidade anterior que tange o tema alternadores, que são dispositivos voltados **à** geração de energia por meio de movimento provido por uma máquina primária, como, por exemplo, uma turbina hidráulica ou motor de combustão interna, à gasolina ou à diesel, em casos de geradores diesel, conhecidos como "Grupo Motor Gerador", ou GMG.

É bastante comum o uso deste tipo de tipo de tecnologia apoiando o sistema de telecomunicações e hospitais, onde a falta de energia elétrica da concessionária não pode interromper seu funcionamento, pois consideram-se como prioritários estes serviços.

Usualmente temos várias topologias aplicadas de alternadores, que são geradores de corrente alternada, em que um modelo bastante utilizado atua com excitação CC em um enrolamento dado em torno do rotor, com campo girante

acionado por uma máquina primária, com relação ao estator da máquina síncrona, com enrolamentos conectados à carga. A Figura 7 mostra um diagrama representativo de um gerador monofásico para entendimento de sua filosofia operacional:

Note que na Figura 7 temos um diagrama que mostra a presença de um gerador de campo magnético, o qual é inserido no enrolamento CC do rotor, denominado de bobina de excitação. Este rotor é acoplado a uma máquina primária e entra em movimento com a velocidade necessária para que possamos obter a frequência desejada na saída da máquina síncrona, assim como vimos na Unidade 8 deste livro.

O circuito do estator é composto da impedância dos enrolamentos com características resistivas e indutivas, além de contar com a influência do efeito de reação da armadura. A tensão fornecida na saída da máquina síncrona é fornecida à carga que pode ter características resistiva, resistiva-indutiva e resistiva-capacitiva.

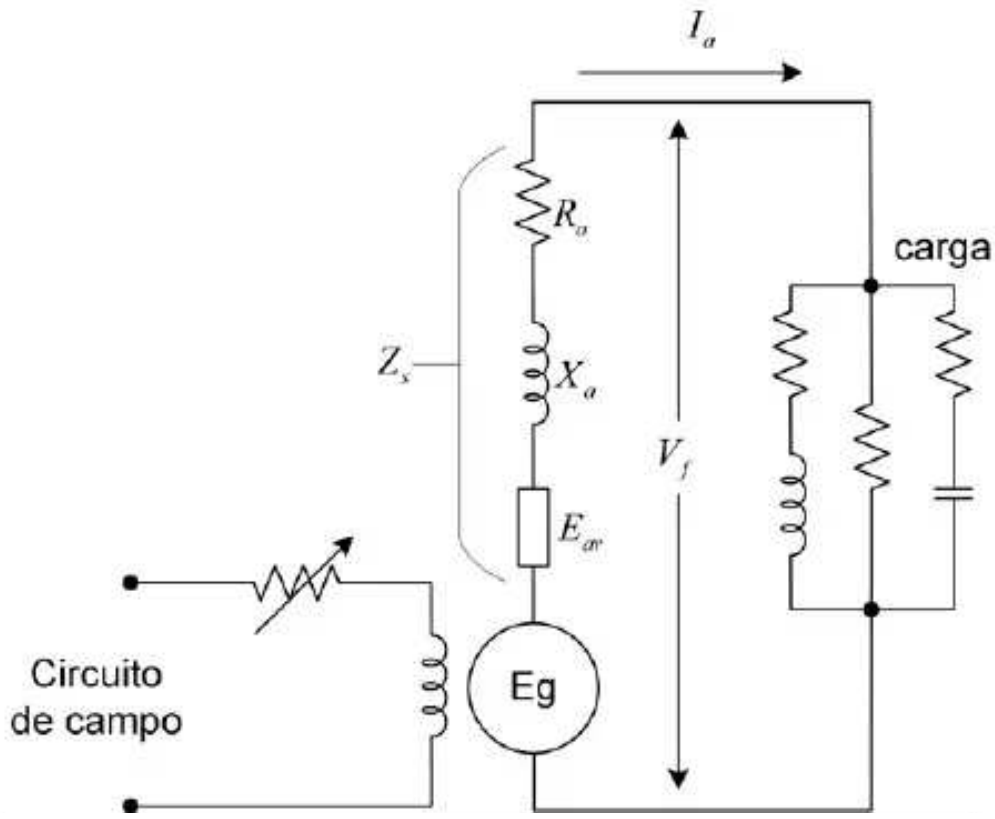


Figura 7 - Circuito equivalente de um gerador síncrono monofásico
Fonte: adaptada de Kosow (2005).

Descrição da Imagem: esta figura mostra um diagrama representativo de um gerador síncrono monofásico, o qual possui circuito de campo excitando o rotor enquanto os enrolamentos do estator recebem fluxo magnético por meio do entreferro e disponibilizam a tensão para a carga, que pode ser resistiva, resistiva e indutiva e resistiva e capacitiva combinadas.

A Equação 45 define a tensão "V_f" nos terminais, por fase (KOSOW, 2005):

$$\dot{V}_f = \dot{E}_{gf} - \dot{I}_a\dot{R}_a - \dot{I}_a(jX_a) \pm \dot{E}_{ar}$$

Equação 45

Onde:

$\dot{E}_{gf}$: é a tensão gerada por fase;

$\dot{I}_a\dot{R}_a$: queda de tensão nos enrolamentos da armadura com resistência R_a por fase;

$\dot{I}_a(jX_a)$: é a queda de tensão sobre a reatância do enrolamento da armadura

relacionada ao fluxo disperso;

E_{ar} : efeito da reação da armadura (pode ser magnetizante ou desmagnetizante).

Note que a Equação 45 demonstra a relação entre a tensão de saída para a carga e as componentes de queda de tensão existentes na máquina para uma configuração monofásica, sendo que há aplicações onde a saída é trifásica, neste caso, a carga deve ser conectada em estrela, por exemplo, para que as correntes das fases idênticas possam fluir.

A Figura 8 apresenta um operador verificando o estado de um dos dois geradores diesel de um grupo motor gerador (GMG) instalado em uma estação de telecomunicações. Este equipamento possui sistema de controle de partida que conecta sua saída à rede de distribuição da concessionária, comutando-a para que apenas a tensão gerada por ele atenda à carga, com sistema de sequência de fases e amplitude que realizam o sincronismo da tensão gerada com a tensão preexistente nas fases da concessionária.

Figura 8 - Grupo motor gerador - gerador diesel acoplado à máquina síncrona com excitação CC para geração de tensão CA

Descrição da Imagem: esta figura apresenta a foto de dois grupos motores geradores diesel de porte médio, com a presença de um operador. Os equipamentos são dotados de radiador de calor com ventilação forçada, entrada e saída de ar, filtros e motor diesel semelhante ao utilizado por caminhões de grande porte acoplado ao alternador de estrutura cilíndrica.

Esta tecnologia atualmente é utilizada para atender a empresas que encontram uma alternativa ao custo da energia elétrica em determinados horários onde a tarifa de energia é abusiva, normalmente entre as 18h e 21h no Brasil. Segmentos como supermercados, hospitais, universidades, estações telefônicas, shoppings centers, entre outros ambientes fazem uso deste recurso, seja por motivação econômica ou para emergências por falta de energia.

Os modelos trifásicos mais modernos contam com sistema automático de partida por falta de energia da rede ou mesmo por programação de eventos, com preaquecimento do motor diesel e partidas de tempos em tempos para evitar falhas no momento do uso, quando em grandes intervalos de tempo sem uso.

Há modelos de geradores que podem ser utilizados nas residências onde a alimentação é monofásica e a máquina primária é baseada em motor à gasolina, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Gerador à gasolina

Descrição da Imagem: esta figura apresenta uma foto de um gerador portátil de energia elétrica acionado por motor à gasolina com painel de conexão para os cabos localizados na parte frontal e tanque de combustível na parte superior em amarelo.

Esta alternativa é manual, porém pode solucionar o fornecimento de energia elétrica com cargas instaladas de poucos kW, ao contrário dos trifásicos à diesel que podem ter alguns MW de potência.

O conhecimento das relações de potência em máquinas elétricas é necessário para que o profissional Engenheiro Eletricista possa atuar no dimensionamento de motores aplicados ao bombeamento de água, elevação de cargas, refrigeração e climatização, fabricantes de máquinas industriais, entre outros.

O dimensionamento correto do motor pode melhorar o fator de potência de uma instalação, logo, cabe ao Engenheiro Eletricista dominar o motor corretamente para evitar sobras e, com isso, potência reativa em demasia. Esta prática se dá em ambientes profissionais industriais onde máquinas dependem totalmente de motores e os acionam várias vezes ao dia. Esta é uma oportunidade para o Engenheiro Eletricista atuar em campo na análise do consumo e do fator de potência em

motores elétricos de indução.

Chegamos ao final desta unidade e convido você a revisitar todos os principais termos que tivemos a oportunidade de estudar até aqui, logo, por meio do mapa conceitual a seguir, você deve analisar, buscá-lo ao longo da unidade e preencher seu próprio mapa conceitual a fim de fixar os conhecimentos adquiridos com esta unidade.

Descrição da Imagem: esta figura mostra um mapa conceitual com o termo central "Relações de potÊncia em máquinas elétricas" e demais termos que convergem diretamente para ele: variação de energia armazenada, energia armazenada no campo elétrico, densidade de carga elétrica, lei da força de Lorentz, regra da mão direita, força aplicada por unidade de volume, velocidade angular e conjugado eletromecânico.

MAPA MENTAL

1. Em uma máquina industrial que aciona uma esteira de transporte, o motor elétrico assíncrono trifásico de 4 polos consome uma corrente simétrica em cada fase de $26,4\ A$ alimentado em $220\ V$ e $60\ Hz$, com resistência de $0,18\ \Omega$, por fase e está com a velocidade em seu eixo de $1730\ rpm$. Assinale a alternativa que informe o valor correto da potência do rotor.
   a) $4320,12\ W$.
   b) $2650,04\ W$.
   c) $4900\ W$.
   d) $154,8\ W$.
   e) $291,66\ W$.

2. Um motor polifásico apresenta escorregamento de 0,022 com uma potência no eixo de 5200 W. Assinale a alternativa que apresente o valor correto da potência dissipada no rotor para o problema dado.
   a) $22\ W$.
   b) $5000\ W$.
   c) $127,27\ W$.
   d) $116,97\ W$.
   e) $14,96\ W$.

3. O estudo dos fundamentos de motores e relações de potência em máquinas elétricas é fundamental para que o Engenheiro possa atuar com os equipamentos da indústria moderna. Baseado nos estudos das relações de tensões, correntes e potências em máquinas elétricas, assinale a alternativa correta.
   a) Quando o sistema é dotado apenas de campo elétrico, a força de ***Lorentz*** pode ser calculada apenas pela carga da partícula, pois $\vec{B} = 0$, logo, a força atua na direção de $\vec{E}$, independentemente de qualquer movimento da partícula.
   b) Quando o sistema apresenta características puramente magnéticas, temos que $\vec{E} = 0$, logo, restam apenas as componentes de fluxo, escorregamento "s" e inércia "J".
   c) A força de Lorentz define o conjugado e o torque de um motor elétrico, pois a força é diretamente proporcional ao conjugado e ao escorregamento quadrático.
   d) A lei de Lenz impõe que a soma de todas as forças magnéticas em uma mesma direção produz como resultante a corrente contra eletromotriz.

e) As perdas no rotor de um motor de indução são diretamente proporcionais ao escorregamento do motor e ao quadrado da reatância de cada bobina do enrolamento do estator por fase.

UNIDADE 1

ALUISIO, S. G.; CRIVELLARI, C. R. **Conversão Eletromecânica de Energia**. São Paulo: Saraiva, 2010.

FALCONE, A. G. **Eletromecânica** – Volume 1: Transformadores e Transdutores, Conversão Eletromecânica de Energia. São Paulo: Blucher, 2018.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

MALVINO, A. P. **Eletrônica**. São Paulo: Makron Books, 1995. v. 1.

MAYA, P. A. **Controle Essencial.** São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

UNIDADE 2

FALCONE, A. G. **Eletromecânica**. Vol. 1: Transformadores e Transdutores, Conversão Eletromecânica de Energia. São Paulo: Blucher, 2018.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

UNIDADE 3

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

SERWAY, R. A. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Vol. 3: Eletricidade e Magnetismo. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

UNIDADE 4

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

UNIDADE 5

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. Porto Alegre: Globo, 1971.

UNIDADE 6

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. Porto Alegre: Globo, 1971.

UNIDADE 7

BARNES, M. **Practical Variable Speed Drives and Power Electronics**. Burlington: Newnes, 2003.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. São Paulo: Érica, 2007.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

UNIDADE 8

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. São Paulo: Érica, 2007.
KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

WEG. **Guia de Especificação Motores Elétricos** [eletrônica]. Jaraguá do Sul: WEG, 2021.

UNIDADE 9

FALCONE, A. G. **Eletromecânica**. Vol. 1: Transformadores e Transdutores, Conversão Eletromecânica de Energia. São Paulo: Blucher, 2018.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

UNIDADE 1

1. C.

   Solução:

   $$P_P = P_S$$

   $$V_P \times I_P = V_S \times I_S$$

   $$220 \times I_P = 127 \times 10$$

   $$I_P = \frac{127 \times 10}{220}$$

   $$I_P = 5{,}77\ A$$

2. B. Pois o encoder incremental é um elemento que informa por meio de sinais elétricos a posição de um objeto ou eixo em deslocamento através de pulsos oriundos de acoplamento óptico.

3. A. Pois os Sistemas Eletromecânicos de Controle envolvem agrupamentos de dispositivos com funções que se adequam a analisar e atuar sobre parâmetro como a resposta em regime transitório ou a capacidade de amplificação de um sinal, enquanto que outros sistemas atuam sobre sinais de grandes correntes.

UNIDADE 2

1. A. Dado que $v(t) = v_L(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt}$, substituindo-se em cada componente de tensão, fica:

   $$i(t) = G\frac{d\lambda(t)}{dt} + C\frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} + \frac{1}{L}\lambda(t)$$

2. C. O superdimensionamento de um elemento indutivo pode significar problemas com energia reativa em excesso, o que pode resultar em multas na tarifa de energia, dado que a potência reativa decorre do campo magnético produzido e não aproveitado pela carga, logo, o correto é dimensionar o transformador para a carga a ser alimentada.

3. B. A variação de temperatura consiste em uma influência externa que pode alterar o comportamento de componentes e com isso a corrente elétrica que circula pelo seu corpo, o que remete em muitos casos ao controle adaptativo, técnica que pode estabelecer ações para compensar variações térmicas influentes em semicondutores e demais elementos de máquinas elétricas.

UNIDADE 3

1. E. Solução:

$$0,29H = 100.0,0116$$
$$H = 4\ A/m$$

2. C. Solução:

$$i = \frac{4.0,29}{10}$$
$$i = 0,116\ A$$

3. B. O valor da tensão induzida em uma espira de fio condutor é proporcional à razão de variação das linhas de força que passam através daquela espira, dado que o condutor metálico, quando imerso em fluxo magnético, produz ddp proporcional ao número de espiras deste enrolamento.

UNIDADE 4

1. D. Pois: "O valor da tensão induzida em uma simples espira de fio é proporcional à razão da variação das linhas de força que passam através daquela espira" (KOSOW, 2005, p. 4).

2. C. Pois os materiais duros apresentam laços largos de histerese, elevados valores de densidade de fluxo remanescente e coercividade, além de apresentarem baixa permeabilidade magnética ($\mu_r \approx \mu_0$).

3. A. Pois quando a corrente i atinge valor igual a zero, a densidade de fluxo magnético B não é igual a zero, o que confere o termo densidade de fluxo magnético remanescente "B_r", caracterizando um atraso de B em relação à H, definindo o termo *histerese magnética*, que deriva da palavra grega "*υστέρησις*" que significa retardo ou atraso.

UNIDADE 5

1. B. Pois os enrolamentos são executados no centro do núcleo, já que há uma divisão uniforme do fluxo em ambos os lados e, assim, a produção de f.e.m. nos condutores.

2. A. Pois, na operação a vazio de um transformador, o menor valor da corrente de magnetização é obtido quando temos o menor valor de relutância. Dado que matematicamente temos:

$$i_p(t) = \frac{\Phi.\Re}{N_1}$$

Assim, se a relutância for menor, precisaremos de uma corrente menor para produzir o mesmo

CONFIRA SUAS RESPOSTAS

fluxo magnético.

3. E. Pois o regime de funcionamento de um transformador é determinado pela necessidade de f.e.m., haja vista que: quando um transformador com carga fornece uma corrente $i_s(t)$ em seu secundário, o enrolamento primário absorve da rede elétrica à qual está conectado a corrente total i_1, que é a resultante magnetizante $i_p(t)$ e da corrente de reação $i_p^{'}(t)$, logo, ao se variar a corrente no enrolamento secundário do transformador, o fluxo Φ é inalterado, sofrendo variações apenas $i_p^{'}(t)$, juntamente com $i_s(t)$.

UNIDADE 6

1. C. Pois as correntes parasitas são aquelas que ocorrem da indução de correntes no próprio núcleo metálico, que se contrapõe à corrente geradora e com isso produz oposição ao fluxo oriundo da tensão aplicada no enrolamento primário do transformador.

2. A. Pois, de acordo com a tabela apresentada no exercício, a chapa $145-35$ apresenta perda de $3{,}2\ a\ 3{,}6\ W/kg$ para uma indução eletromagnética da ordem de $15.000\ Gauss$, dado que ω_{15} corresponde a esse valor de indução magnética.

3. B. Pois, quando não há corrente no enrolamento secundário do transformador, no enrolamento primário só haverá uma pequena corrente primária necessária a gerar fluxo para induzir a tensão que será associada a uma carga, que então consumirá potência no enrolamento secundário.

UNIDADE 7

1. B. Pois uma máquina polifásica, quando alimentada por tensão também polifásica, tem os enrolamentos de suas bobinas do estator percorridas por corrente que, por sua vez, produz fluxo magnético em todo o circuito.

2. D. Pois os motores assíncronos de gaiola de esquilo possuem seus condutores curto circuitados pelas placas laterais do rotor.

3. C. Pois o torque no eixo desta máquina depende da produção de fluxo e, consequentemente, para obter este resultado, é necessário apresentar baixa relutância.

UNIDADE 8

1. B. $1800\ rpm$, pois: sendo:

$$f = \frac{N_s.p}{120} = [Hz]$$, e substituindo-se os dados na equação, temos:

$$N_s = \frac{f.120}{p} = \frac{60.120}{4} = 1800\ rpm$$

CONFIRA SUAS RESPOSTAS

CONFIRA SUAS RESPOSTAS

2. E. Pois, para valor mínimo de $E^{'}_{gf}$:

$$E^{'}_{gf} = \dot{V}_f + I_f \dot{Z}_f = 100 + 7,3 = 107,3\ V$$

Para valor máximo de $E^{''}_{gf}$:

$$E^{''}_{gf} = \dot{V}_f + I_f \dot{Z}_f = 107 + 7,3 = 114,3\ V$$

Para valor médio de $\overline{E_{gf}}$:

$$\overline{E_{gf}} = \frac{(E^{'}_{gf} + E^{''}_{gf})}{2} = \frac{(107,3 + 114,3)}{2} = 110,8\ V$$

3. A. Pois o motor de dois capacitores possui um capacitor para auxiliar na partida e outro permanente para aumentar o torque enquanto o motor está em regime de serviço contínuo.

UNIDADE 9

1. E. Solução:

1º passo:

Cálculo da potência dissipada no enrolamento do estator:

$$P_{estator} = 3I_1^2 R_1 = 3(26,4)^2 0,18 = 376,35\ W$$

2º passo:

Cálculo da potência no entreferro:

$$P_g = P_{entrada} - P_{estator} = 7500 - 376,35 = 7123,64\ kW$$

3º passo:

Cálculo da velocidade síncrona:

$$n_s = \left(\frac{120}{p}\right) f_e = \left(\frac{120}{4}\right) 60 = 1800\ rpm$$

4º passo:

Cálculo do escorregamento:

$$s = (n_s - n)/n_s = (1800 - 1730)/1800 = 0,038$$

5º passo:

Cálculo da potência do rotor:

$$P_{rotor} = sP_g = 0,038.7,5.10^3 = 291,66\ W$$

2. D. Solução:

   cálculo da potência no rotor:

$$P_{rotor} = \left(\frac{s}{1-s}\right)P_{mec} = \left(\frac{0,022}{1-0,022}\right).5200 = 116,97\ W$$

3. A. Pois em um sistema onde há apenas campo elétrico, quem define a intensidade da força é a carga elétrica, conforme podemos ver por meio da equação: $\vec{F} = q\vec{E}$.

CONFIRA SUAS RESPOSTAS